

Carlos Andrés Sánchez Quintero

**DESENVOLVIMENTO DE UMA LIGAÇÃO  
ESTRUTURAL PARA CONSTRUÇÃO COM  
BAMBU GUADUA**

Dissertação submetida ao  
Programa de Pós-Graduação  
em Arquitetura e Urbanismo da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do  
Título de Mestre em Arquitetura  
e Urbanismo.

Orientador: Wilson Jesuz da  
Cunha Silveira, Dr.

Florianópolis

2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sánchez Quintero, Carlos Andrés

Desenvolvimento de uma ligação estrutural para construção  
com bambu Guadua / Carlos Andrés Sánchez Quintero ;  
orientador, Wilson Jesus da Cunha Silveira -  
Florianópolis, SC, 2015.

118 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Arquitetura . 3. Bambu  
Guadua . 4. Ligação estrutural . 5. Bioconstrução. I.  
Silveira , Wilson Jesus da Cunha . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Carlos Andrés Sánchez Quintero

**DESENVOLVIMENTO DE UMA LIGAÇÃO ESTRUTURAL  
PARA CONSTRUÇÃO COM BAMBU GUADUA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Arquitetura e Urbanismo”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

---

Fernando Barth, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo

Banca Examinadora:

---

Wilson Jesus Da Cunha Silveira

Orientador/Presidente – PósARQ/UFSC

---

Fernando Barth, Dr.

PósARQ/UFSC

---

Lisiane Ilha Librelotto, Dr<sup>a</sup>.

PósARQ/UFSC

---

Vanessa Goulart Dorneles,  
Dr<sup>a</sup>.

PósARQ/UFSC

---

Normando Perazzo  
Barbosa, Dr.

UFPB

Florianópolis, 2015



A mis padres, por el ejemplo.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela experiência e a minha família pelo apoio. A meus pais Mariano e Glória pela confiança e pela incondicional companhia. Aos meus irmãos pelo amor e amizade.

Obrigado Laura pelo amor, paciência e ajuda imensurável. Amo você.

Obrigado Bruno e Natalia pela companhia, vocês são minha família no Brasil. À Lê pelos sorrisos. Aos meus colegas do mestrado e às meninas colombianas por fazer desta experiência inolvidável.

Ao Pipe pela paixão pela arquitetura e pela Guadua.

Agradeço a meu orientador Wilson e ao professor Fernando Barth pelos aportes e a confiança no processo. Aos membros da banca pelos ensinamentos e ideias.

Obrigado Mariany pela ajuda e boa disposição.

Cada pessoa do caminho fez que essa experiência for memorável, consciente ou inconscientemente alguns de vocês me deram força, animo, sua ajuda, companhia e sorrisos no momento certo. Muito obrigado.

Obrigada à CAPES pelo apoio financeiro que permitiu a realização do mestrado.





## RESUMO

O bambu é um material de construção com uma capacidade insuperável de renovação e propriedades mecânicas importantes para o projeto de estruturas. É também um material econômico com grande versatilidade na indústria da construção, no entanto, devido a sua forma, em sua condição natural roliça, apresenta limitações formais na configuração de estruturas e patologias pós-construção associadas com a técnica construtiva. O objetivo da pesquisa foi desenvolver uma ligação estrutural para construção com bambu Guadua, com parâmetros de baixo custo, pré-montagem, industrialização de peças e versatilidade formal. Foram desenvolvidas as peças que compõem a ligação e feita uma análise das possibilidades arquitetônicas que fornece. Depois foram feitos, na Universidade Nacional da Colômbia em Medellín, ensaios de compressão e tração em oito corpos de prova de bambu Guadua com o sistema de ligação desenvolvido. Os ensaios de resistência foram realizados para duas dimensões de terminal e em duas configurações: linear e dois elementos em cruz. A ligação atingiu valores de resistência à tração acima dos 13 kN na configuração linear e acima de 32 kN na configuração em cruz. Esses valores representam 157,3% e 187,5% respectivamente, quando comparado com os valores de esforços admissíveis fornecidos pela norma colombiana NSR-10, para estruturas de bambu Guadua. Esses valores poderiam ser maiores uma vez que no ensaio a falha apresentou-se nas barras rosqueadas de sujeição à prensa. Quando submetida à compressão, os elementos de ligação atingiram valores acima de 16 kN na configuração linear e acima de 19 kN na configuração cruzada. Isso corresponde a 240,9% e 121,2% respectivamente, dos valores de referência da norma. Por fim, foi feito o projeto de um protótipo, construindo uma parte da estrutura, utilizando o sistema de ligação desenvolvido. Assim, pode-se concluir que a ligação tem um bom desempenho estrutural, especialmente aos esforços de tração no sentido axial, podendo ser utilizada na construção.

Palavras-chave: Arquitetura, Bambu Guadua, Ligação estrutural, Bioconstrução.



## ABSTRACT

Bamboo is a building material that can renew it self in a unbeatable rate, and has important mechanic properties for been used on structural projects. Is ass well, a very versatile element on the building industry and a very economic material. However, its natural rounded shape restricts constructing formal possibilities and favor the appearance of pathologies associated with the building technique. The aim of the research was to develop a structural construction joint with Guadua Bamboo taking into account parameters of low cost, pre-assembly possibilities, easy implementation and formal versatility. The joint pieces were designed and developed and a formal analysis was made to determine the architectural possibilities of the element. Afterwards, there were conducted a series of tensile and compressive tests on eight sample bodies constructed whit Bamboo Guadua and the designed joint, on the Universidad Nacional de Colombia's structures laboratory. The strength tests were applied on two joints with different sizes arranged on to configurations: linear and crossed.

The joint reached tensile strength values over 13 kN for the linear configuration, and over 32 kN for the crossed one. Those values represent 157,3% and 187,5% of the Colombian NSR-10 regulation admissible strength values for Bamboo Guadua. It was observed that those values could be easily improved, because the structure failure was on the threaded bar grabbed to the press. For the compressive tests the results came above 16 kN for the linear configuration and above 19 kN for the crossed one. This represent 240,9% and 121,2% of the Colombian NSR-10 regulation admissible strength values for Bamboo Guadua.

Finally a structural portion of the design prototype was build with the developed joint, by which was concluded that the element has good structural performance, especially with tensile axial forces, making it suitable for building projects.

**Keywords:** Architecture, Guadua (bamboo), structural joint, Bioconstruction.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Habitat natural do bambu. Fonte: National Geographic (1980).....	7
Figura 2. (1) Esquema da interligação das fibras que formam o diafragma na região dos nós. Disponível em: <a href="http://bambusexperte.wordpress.com/">http://bambusexperte.wordpress.com/</a> (2) Corte transversal da parede do colmo do bambu. Disponível em: <a href="http://bambusexperte.wordpress.com/">http://bambusexperte.wordpress.com/</a> .....	10
Figura 3. Comparação da resistência e rigidez em relação à densidade do bambu com outros materiais de construção. Fonte: Janssen (2000). .....	11
Figura 4. Imagens ilustrativas edificações com bambu (1) 24H-architecture. Disponível em: <a href="http://www.designboom.com/architecture/24h-architecture-childrens-activity-and-learning-center-thailand/">http://www.designboom.com/architecture/24h-architecture-childrens-activity-and-learning-center-thailand/</a> (2-4) Edificações do escritório Ibuku. Disponível em: <a href="http://ibuku.com/">http://ibuku.com/</a> (5-6) Edificações do arquiteto Simón Velez. Disponível em: <a href="http://www.archdaily.co/co/02-265878/arquitectura-en-bambu-la-obra-de-simon-velez">http://www.archdaily.co/co/02-265878/arquitectura-en-bambu-la-obra-de-simon-velez</a> .....	15
Figura 5. (1) Guadua Angustifolia Kunt. Disponível em: <a href="http://www.bambooinvitro.com/guadua-angustifolia">http://www.bambooinvitro.com/guadua-angustifolia</a> (2) Guadua Chacoensis. Disponível em: <a href="http://www.bamboocostarica.com/Materia-Prima3.html">http://www.bamboocostarica.com/Materia-Prima3.html</a> .....	22
Figura 6. (1) Dendrocalamus Giganteus. Disponível em: <a href="http://www.guaduabamboo.com/blog/dendrocalamus-giganteus">http://www.guaduabamboo.com/blog/dendrocalamus-giganteus</a> (2) Bambusa Vulgaris. Disponível em: <a href="http://www.guaduabamboo.com/blog/bambusa-vulgaris">http://www.guaduabamboo.com/blog/bambusa-vulgaris</a> .....	23
Figura 7. Métodos de propagação do bambu. (1) Sementes. Disponível em: <a href="http://www.apuama.org/">http://www.apuama.org/</a> (2) Segmentos do Colmo. Disponível em: <a href="http://www.apuama.org/">http://www.apuama.org/</a> (3) Rizoma. Disponível em: <a href="http://www.cicap.org.pe/">http://www.cicap.org.pe/</a> .....	25
Figura 8. Bambu triangular e quadrado, imagens ilustrativas. Fonte: (1) Disponível em: <a href="http://www.artbamboo.com.tw/">http://www.artbamboo.com.tw/</a> (2) Agencia de notícias Universidade Nacional de Colômbia. ....	25
Figura 9. Tratamentos naturais. (a) Cura na mata. (b) Cura por imersão na água. (c) Cura por calor. (d) Cura pela fumaça. Fonte: Hidalgo (1981) .....	26
Figura 10. Tratamentos químicos. (1) Imersão parcial. (2) Imersão total. (3) Método Boucherie modificado. Fonte: Hidalgo (1981) .....	29

Figura 11. Cortes mais recorrentes no Bambu na construção. ....	32
Figura 12. Ligações com amarrações, imagens ilustrativas. Fonte:	
(1) Hidalgo, 1981. (2) Vo Trong Nghia Architects, 2009. ....	32
Figura 13. Ligações parafusadas, imagens ilustrativas. (1) Ligação	
parafusada simples. (2) Ligação Velez. Fonte: (1 e 2) Norma	
Técnica E.100, Peru (2012). (3) 24H Architecture (2009) .....	33
Figura 14. Pavilhão Zeri por Simón Velez (2) Ponte na Colômbia por	
Jörg Stamm. Disponível em:	
<a href="https://bambusexperte.wordpress.com">https://bambusexperte.wordpress.com</a> .....	34
Figura 15. Ligação desenvolvida por Waldemar Rothe. Fonte:	
SOUSA, 2013. ....	35
Figura 16. (1) Ligação desenvolvida por Duff. Fonte: MINKE, 2012	
(2) Ligação Conbam (3) Ligação Conbam na <i>Feng Shui House</i>	
<i>Germany</i> . Fonte (2-3) Disponível em: <a href="http://www.conbam.de">www.conbam.de</a> .....	36
Figura 17. (1) Esfera Mero Disponível em: <a href="http://www.laefsl.com/">http://www.laefsl.com/</a>	
(2) Ligação Koolbamboo. Disponível em:	
<a href="http://www.koolbamboo.com/">http://www.koolbamboo.com/</a> (3) Ligação Guaduatech.	
Disponível em: <a href="http://www.guaduatech.com/">http://www.guaduatech.com/</a> .....	36
Figura 18. Imagens ilustrativas edifício conceito desenvolvido por	
Saint Val. (1) Detalhe da ligação (2) Conceito edifício (3)	
Conceito agrupação. Disponível em:	
<a href="http://www.evolo.us/architecture/bamboo-housing-for-haiti-laurent-saint-val/">http://www.evolo.us/architecture/bamboo-housing-for-haiti-</a>	
<a href="http://www.evolo.us/architecture/bamboo-housing-for-haiti-laurent-saint-val/">laurent-saint-val/</a> .....	37
Figura 19. Ligações modernas, imagens ilustrativas. Fonte: (1) Tim	
Obermann, 2004 (2) Shoei Yoh, 1989 (3) Renzo Piano, 1997 .....	38
Figura 20. Formas de uso do bambu na construção. (1) Esterilhas.	
Fonte: Eko Prawoto, 2013. (2) Tiras. Fonte: Eko Prawoto, 2013.	
(3) Bambu Laminado Colado-BLC. Disponível em:	
<a href="http://criaarquitetura.blogspot.com.br/2010/01/laminados-de-bambu.html">criaarquitetura.blogspot.com.br/2010/01/laminados-de-</a>	
<a href="http://criaarquitetura.blogspot.com.br/2010/01/laminados-de-bambu.html">bambu.html</a> .....	39
Figura 21. Imagem ilustrativa da obtenção de dados de diâmetro e	
espessura de parede dos colmos. ....	45
Figura 22. Partes da ligação.....	53
Figura 23. Imagens ilustrativas do processo de design do terminal .....	54
Figura 24. Opções de terminal (1) Terminal com dois pontos de	
conexão. (2) Terminal com um ponto de conexão. ....	55
Figura 25. Imagens ilustrativas montagem da ligação (1)	
Montagem terminal-colmo. (2) Montagem de um terminal (3)	
Montagem de dois terminais. ....	58

Figura 26. Dimensões e isométrico da tipologia L25mm-P9,5mm(3/8"). (Dimensões em mm).....	59
Figura 27. Dimensões e isométrico da tipologia L38mm-P12,5mm(1/2"). (Dimensões em mm).....	61
Figura 28. Processo de montagem e fixação do terminal no colmo de bambu Guadua. ....	62
Figura 29. Configuração coluna-viga em T.....	63
Figura 30. (acima) Ligação terminal-colmo. (abaixo) Ligação terminal-terminal.....	64
Figura 31. Ligação duas terminais-colmo.....	65
Figura 32. Ligação de três terminais. ....	65
Figura 33. Ligação de quatro terminais.....	66
Figura 34. Conexão terminal-base em diferentes ângulos.....	66
Figura 35. Configuração de superfícies por ligação de seis terminais em disposição radial. ....	67
Figura 36. Conector tipo aro perfurado. ....	67
Figura 37. Configuração de fachadas com conector tipo aro. ....	68
Figura 38. Conector tipo aro em 3D.....	68
Figura 39. Configuração de estruturas utilizando a esfera Mero.....	69
Figura 40. Conectores para configuração de estruturas tipo domo. ....	69
Figura 41. Conexão hexagonal. ....	70
Figura 42. Conexão pentagonal. ....	70
Figura 43. Conexão triangular. ....	71
Figura 44. (1) e (2) Maquinaria da siderúrgica Logistool. (3) Terminais produzidas na siderúrgica Logistool.....	71
Figura 45. (1) e (2) Maquinaria da siderúrgica Ingenox. (3) Terminais produzidas na siderúrgica Ingenox. ....	72
Figura 46. (1) Prensa Universal PINZUAR para ensaios de materiais. Disponível em: <a href="http://www.pinzuar.com.co/">http://www.pinzuar.com.co/</a> (2) Laboratório de Estruturas Universidade Nacional da Colômbia em Medellín. ....	74
Figura 47. Disposição das barras rosqueadas de fixação terminal-colmo para os corpos de prova submetidos à tração (eixo vermelho). ....	75
Figura 48. Procedimento do ensaio de tração no corpo de prova TRA – 3/8" – L. ....	76
Figura 49. Estado do corpo de prova TRA – 3/8" – L após o ensaio.....	76
Figura 50. Procedimento do ensaio de tração no corpo de prova TRA – 3/8" – X.....	77
Figura 51. Estado do corpo de prova TRA – 3/8" – X após o ensaio. ....	77

Figura 52. Procedimento do ensaio de tração no corpo de prova TRA – 1/2” – L. ....	78
Figura 53. Estado do corpo de prova TRA – 1/2” – L após o ensaio. ....	78
Figura 54. Procedimento do ensaio de tração no corpo de prova TRA – 1/2” – X. ....	79
Figura 55. Estado do corpo de prova TRA – 1/2” – X após o ensaio. ....	79
Figura 56. Procedimento do ensaio de compressão no corpo de prova COM – 3/8” – L. ....	80
Figura 57. Estado do corpo de prova COM – 3/8” – L após o ensaio. ....	81
Figura 58. Procedimento do ensaio de compressão no corpo de prova COM – 3/8” – X. ....	81
Figura 59. Estado do corpo de prova COM – 3/8” – X após o ensaio. ....	82
Figura 60. Procedimento do ensaio de compressão no corpo de prova COM – 1/2” – L. ....	83
Figura 61. Estado do corpo de prova COM – 1/2” – L após o ensaio. ....	83
Figura 62. Procedimento do ensaio de compressão no corpo de prova COM – 1/2” – X. ....	84
Figura 63. Estado do corpo de prova COM – 1/2” – X após o ensaio. ....	84
Figura 64. Comparação dos resultados dos ensaios de laboratório. A faixa cinza representa os valores atingidos durante a deformação mas sem falha do elemento. ....	85
Figura 65. Determinação da área de contato de transmissão de esforços na Guadua. ....	87
Figura 66. Comparação dos resultados dos ensaios de laboratório com os valores admissíveis da norma NSR-10. A faixa cinza representa os valores atingidos durante a deformação mas sem falha do elemento. ....	88
Figura 67. (1) Falha da ligação submetida à compressão. (2) Braçadeiras metálicas de alta resistência. (3) Terminal com aba soldada. ....	89
Figura 68. Isométrico fachada Norte do protótipo. ....	100
Figura 69. Planta arquitetônica do protótipo. ....	101
Figura 70. Corte 1-1 (Norte – Sul) do protótipo. ....	102
Figura 71. Cortes A-A e B-B (Leste – Oeste) do protótipo. ....	102
Figura 72. Isométrico Sul-leste do protótipo. ....	103
Figura 73. Isométrico Sul-oeste do protótipo. ....	103
Figura 74. Detalhe conexão entre o subsistema de fundação e a estrutura. ....	104
Figura 75. Detalhes do sistema de ligação utilizado na estrutura. ....	105
Figura 76. Fachada norte com vedação de painel metálico. ....	106



Figura 77. Cortes dos colmos e montagem dos terminais. ....	108
Figura 78. Montagem dos colmos no lugar de construção. ....	109
Figura 79. Detalhes de pontos de ligação com as terminais desenvolvidas. ....	109
Figura 80. Resultado final da estrutura construída. ....	110
Figura 81. Resultado final da estrutura construída. ....	110
Figura 82. Estrutura construída em relação ao projeto completo do protótipo. ....	111



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Resumo dos ensaios de laboratório aplicados à ligação.	<b>46</b>
<b>Tabela 2.</b> Especificações de design do produto para a ligação	<b>50</b>
<b>Tabela 3.</b> Resumo das diretrizes para ligações no bambu Guadua da Norma NSR-10	<b>55</b>
<b>Tabela 4.</b> Dimensões anatômicas da Guadua Angustifolia	<b>56</b>
<b>Tabela 5.</b> Tensões admissíveis para o bambu GAK segundo a NSR-10 (Valores em MPa)	<b>86</b>
<b>Tabela 6.</b> Resultados dos ensaios em MPa e comparativo com as tensões admissíveis da GAK segundo a NSR-10.	<b>87</b>
<b>Tabela 7.</b> Valores comerciais dos elementos constitutivos do sistema de ligação para o mês de julho de 2015.	<b>90</b>
<b>Tabela 8.</b> Valores comerciais das diferentes tipologias de sistemas de ligação para o mês de julho de 2015.	<b>91</b>
<b>Tabela 9.</b> Quantificação e orçamento de materiais da estrutura do protótipo	<b>107</b>



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing Materials

BLC – Bambu Laminado Colado

BRL – Real Brasileiro

CCB – Cobre-Cromo-Boro

cm – Centímetro

cm<sup>2</sup> – Centímetro quadrado

COM – Compressão

COP – Peso Colombiano

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

c/u – Cada um

GAK – Guadua Angustifolia Kunth

ha – Hectare

INBAR - International Network for Bamboo and Rattan

Kg – Quilograma

Kgf – Quilograma força

km<sup>2</sup> – Quilômetro

kN – Kilonewtons

L – Configuração Linear

m – Metro

m<sup>2</sup> – Metro quadrado

m<sup>3</sup> – Metro cúbico

mm – Milímetro

mm<sup>2</sup> – Milímetro quadrado

MPa – Megapascais

N – Newton

NBR – Norma Brasileira

NSR – Norma de Sismo Resistencia

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

Ton – Tonelada

TRA – Tração

unds - Unidades

USD – Dólar estadunidense

X – Configuração em cruz

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

“ – Polegadas

## **SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1. Objetivo geral .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. ESTRUTURA GERAL DO TEXTO .....</b>	<b>5</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA - CONSTRUÇÃO COM BAMBU .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. O BAMBU.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1. Propriedades físicas do Bambu e fatores que as determinam.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. POTENCIAIS DO USO DO BAMBU .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1. Características Ambientais .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2. Versatilidade de uso na área da construção .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.3. Desempenho estrutural.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.4. Material econômico .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3. LIMITAÇÕES DO USO DO BAMBU.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4. TIPOS DE BAMBU UTILIZADOS COMO ESTRUTURA NA CONSTRUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>2.5. APROVEITAMENTO DO BAMBU NA CONSTRUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.1. Plantio e produção .....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.2. Cura e Preservação.....</b>	<b>26</b>
<b>2.6. UTILIZAÇÃO DO BAMBU NA ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO. ....</b>	<b>30</b>

2.6.1. Sistemas construtivos e ligações com bambu em estado roliço.....	30
2.6.2. Outros elementos de bambu utilizados na construção.....	38
3. METODOLOGIA.....	41
3.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	41
3.2. DESENVOLVIMENTO DA LIGAÇÃO .....	41
3.2.1. Definição dos parâmetros .....	42
3.2.2. Definição dos elementos que compõem a ligação .....	42
3.2.3. Possibilidades formais e arquitetônicas da ligação.....	43
3.2.4. Análise do desempenho estrutural da ligação.....	43
3.2.5. Análise econômica da ligação.....	47
3.3. PESQUISA APLICADA. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO. ....	47
3.3.1. Desenvolvimento do projeto de edificação.....	47
3.3.2. Caracterização do sistema construtivo .....	48
3.3.3. Registro e análise do processo construtivo .....	48
3.4. ANÁLISE PÓS PRODUÇÃO DA LIGAÇÃO E DO PROTÓTIPO – CONSIDERAÇÕES FINAIS. ....	48
4. DESENVOLVIMENTO DA LIGAÇÃO .....	49
4.1. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS.....	49
4.2. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS QUE COMPÕEM A LIGAÇÃO.....	53
4.3. POSSIBILIDADES DE ENCAIXES QUE PERMITE FLEXIBILIDADE FORMAL E ARQUITETÔNICA DA LIGAÇÃO .....	62
4.4. PRODUÇÃO DO TERMINAL DA LIGAÇÃO .....	71
4.5. ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DA LIGAÇÃO.....	72



4.5.1. Ensaios de esforço axial à tração.....	74
4.5.2. Ensaios de esforço axial a compressão .....	80
4.5.3. Análise de resultados dos ensaios de laboratório .....	85
4.6. ANÁLISE ECONÔMICA DA LIGAÇÃO.....	89
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS. ....	93
5.1. CONCLUSÕES .....	93
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	96
APÊNDICE A: PESQUISA APLICADA. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO .....	99
REFERÊNCIAS .....	113
ANEXO A. RESULTADOS ENSAIOS DO LABORATORIO .....	117



## 1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores que maior capacidade tem para dinamizar a economia e ao mesmo tempo mais relacionado está com o desenvolvimento socioeconômico de uma nação é o âmbito da construção. O desenvolvimento de sistemas construtivos com materiais não convencionais, de baixo custo, com qualidade e simples execução favorecem o desenvolvimento das comunidades, tanto nas zonas urbanas quanto nas rurais. No entanto, as opções existentes deste tipo de sistemas construtivos a maioria dos casos supõem processos extremamente artesanais, de baixa segurança ou pouca estabilidade estrutural. Isso, diminui as possibilidades de aproveitamento e forte difusão do sistema, visto que são exigidos tempos de construção elevados e muitas vezes mão de obra especializada, o que se traduz em custos que podem até superar os gastos de um projeto edificado com um sistema construtivo tradicional de alvenaria.

Contudo, é importante pensar como arquitetos nas estratégias para redução dos déficits de prédios especialmente em contextos rurais e suburbanos. As técnicas e os materiais que integram a edificação tem relevância na hora de conceber os prédios, ainda mais em contextos com limitações socioeconômicas, procurando encontrar alternativas de adaptação e de aproveitamento sustentável dos recursos mais adequados. O uso sustentável dos recursos abrange o fato de que os materiais a serem utilizados em determinada zona devem estar disponíveis, a partir de uma perspectiva geográfica, cultural e econômica. Assim, para a maioria das regiões da América Latina o bambu pressupõe um material de construção com grande potencial, próprio da região, econômico e ecológico.

O desafio, então, é desenvolver um sistema construtivo que satisfaça as necessidades ainda de comunidades em vias de desenvolvimento, apontando para uma estratégia econômica e que requeira processos pouco tecnológicos para sua execução, além de responder a requisitos espaciais e formais complexos de qualquer tipologia de edificação. Dessa maneira será possível

garantir uma boa difusão do sistema, ampliando suas possibilidades de influência.

Segundo Trigo (1978), a racionalização no âmbito da construção, trata de organizar, planificar e verificar as técnicas necessárias para melhorar a produtividade e a qualidade do projeto; o que finalmente constitui o caminho para a industrialização da construção e assim estabelece as bases para um desenvolvimento sustentável e racional da arquitetura e da construção. Nos sistemas construtivos com materiais não convencionais encontra-se a construção com Bambu Guadua, que representa um grande potencial visto que é um material de fácil consecução na região latino-americana que não requer processos complexos para sua utilização. Porém, ainda é visto como uma opção pouco prática para a construção de edificações, pois as técnicas existentes raramente permitem a construção de formas complexas mantendo um nível baixo de investimento. Este problema é agravado pelos elementos de ligação existentes para construção com Guadua, que podem ser de dois tipos: Aqueles que utilizam elementos comerciais como amarrações, parafusos ou barras rosqueadas e, em geral, tem baixo custo. Os outros tipos de ligações são aqueles com peças especialmente produzidas para os elementos de Bambu e que permitem desenvolvimentos formais complexos. No entanto, essas últimas tem custos elevados e processos complexos de fabricação e montagem. Entretanto, como apontado por Stamm (2008), ainda não tem sido desenvolvidos muitos elementos de ligação para construção com Guadua que cumpra essas duas necessidades.

Enquanto os esforços nas estruturas de treliças bidimensionais são fáceis de calcular, não há muita experiência em estruturas tridimensionais. Porém (...), estas estruturas ultramodernas abrem muitas perspectivas para a construção com Bambu. (STAMM, 2008)

É fundamental, então, centrar os esforços técnicos em resolver esta brecha existente, para incentivar o uso do sistema

em qualquer tipo de estrutura ou projeto sem que a forma ou a resistência estrutural vejam-se afetadas. Assim, o presente trabalho focasse no método e desenvolvimento de uma ligação estrutural de alta industrialização para construção com Bambu Guadua que possibilite a construção de estruturas complexas.

## 1.1. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

A construção é um dos setores que maiores contribuições tem nas matrizes de demandas energéticas, contaminação e desperdícios no mundo (REN21, 2015). A construção com bambu se apresenta como uma alternativa sustentável, econômica e estruturalmente viável para a construção de estruturas.

O bambu Guadua é um recurso natural de rápida renovação, pois seu crescimento acontece muito rápido. Além do mais, é uma espécie natural que se adapta a uma ampla variedade de contextos climáticos, fazendo-a um recurso de fácil obtenção. Uma vez que o material é cortado, não precisa tratamentos muito complexos para sua utilização industrializada, os mecanismos para sua imunização são diversos e algumas vezes não precisam de ferramenta nenhuma ou elemento adicional. Do ponto de vista construtivo, a Guadua apresenta desempenho estrutural bastante elevados, dando a possibilidade de erigir edificações de até cinco andares, por exemplo o *Green School* em Bali. Além disso, é um sistema efetivo nos processos construtivos e embora seja um elemento natural, é adaptável a projetos modulares.

Tradicionalmente são utilizadas ligações que limitam as estruturas a configurações formais bidimensionais. Quando desenvolvidas estruturas tridimensionais são necessários processos extremamente artesanais. Contudo, no mercado ainda não existem ligações estruturais de baixo custo que possibilitem configurações formais complexas. As opções de elementos de ligação tridimensionais disponíveis, são muito mais custosas que as ligações tradicionais pernadas e requerem elementos e

processos de fabricação complexos, o que finalmente desestimula o uso e a difusão da construção com Guadua. Levando isso em conta, o presente trabalho teve como questão central pesquisar as condições necessárias para desenvolver uma ligação estrutural para construção com Bambu Guadua que atenda requisitos estruturais, formais, estéticos, econômicos, construtivos e de fabricação.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. **Objetivo geral**

Desenvolver uma ligação estrutural para construções com bambu que possibilite a industrialização de peças, a pré-montagem de elementos e a versatilidade formal na concepção de estruturas.

### 1.2.2. **Objetivos específicos**

- Levantar as informações relevantes sobre o Bambu e sua utilização na construção;
- Definir e aplicar um método para o design de um elemento de ligação para construção com Guadua;
- Analisar, mediante modelos computacionais, as possibilidades de configurações arquitetônicas para estruturas em bambu Guadua utilizando a ligação desenvolvida;
- Analisar e avaliar o desempenho estrutural da ligação desenvolvida, mediante ensaios de limite de resistência no laboratório;
- Desenvolver um protótipo em escala natural no qual seja aplicada a ligação proposta, com o intuito de verificar e validar a aplicabilidade da ligação nos elementos de bambu Guadua.

### 1.3. ESTRUTURA GERAL DO TEXTO

O presente trabalho está dividido em cinco partes.

A primeira parte corresponde à introdução, onde é exposta a problemática e apresentada a justificativa e os objetivos geral e específicos da pesquisa.

Na segunda parte é apresentada a fundamentação teórica necessária para embasar a pesquisa. Neste capítulo foi abordado o aproveitamento e uso do bambu na construção, o cenário atual das ligações e os regulamentos atuais para construções com bambu.

Na terceira parte é detalhado o processo metodológico que foi adotado para o desenvolvimento da pesquisa, em todas suas etapas, com o intuito de alcançar os objetivos traçados.

Na quarta parte se apresenta o processo de desenvolvimento da ligação estrutural, detalhando suas possibilidades arquitetônicas. Igualmente se apresenta a análise de desempenho estrutural da ligação e uma análise econômica da mesma.

Na quinta parte é apresentado o protótipo, no qual foi aplicada a ligação desenvolvida, desde o processo de projeto, fazendo uma caracterização do sistema construtivo e o detalhamento do processo construtivo.

Finalmente são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa e considerações finais acerca dos resultados do trabalho desenvolvido.



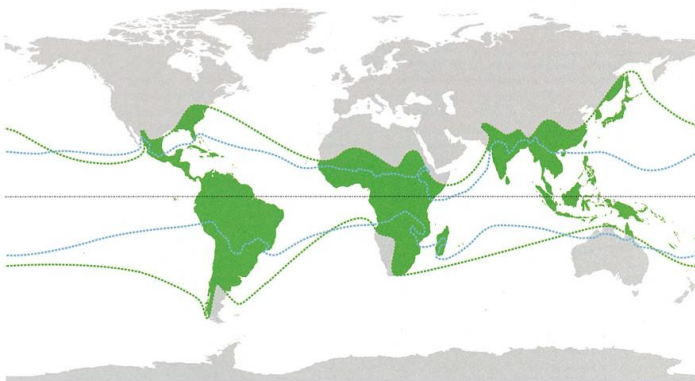


## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - CONSTRUÇÃO COM BAMBU

Neste capítulo é abordado o tema do bambu na construção, desde suas características, potenciais e limitações, assim como os tipos de bambu utilizados estruturalmente na construção e seu processo de aproveitamento. A revisão bibliográfica do tema se faz com o intuito de compreender as características do material e sua utilização, dando uma ênfase primordial ao bambu como material estrutural e às ligações desenvolvidas visando seu uso na concepção de estruturas.

### 2.1. O BAMBU

O bambu é o nome comum das plantas da subfamília Bambusoideae, da família das gramíneas (Poaceae) (JUDZIEWIEZ *et al.*, 2000) sendo conhecido tradicionalmente como “grama gigante” a qual, além do rápido crescimento, tem resistência comparável com a do aço. No mundo existem cerca de 1500 espécies de bambu as quais estão divididas em dois grupos, os bambus lenhosos (Bambuseae) e os bambus herbáceos (Olyrae). (SUNGKAEW *et al.*, 2009). O bambu cresce em diversos climas, mas é encontrado principalmente em regiões tropicais, (Figura 1).



**Figura 1.** Habitat natural do bambu. Fonte: National Geographic (1980).

Esse vegetal tem sido usado desde os tempos antigos por muitas culturas, considerando que cada parte da planta pode ser usada, o bambu pode ser utilizado de inúmeras formas possíveis, entre elas como alimento, como material para fabricação de papel, móveis, tecidos, construção e até mesmo na aviação. Além de ser um dos materiais de construção mais antigos ele está experimentando um renascimento no mundo ocidental por suas qualidades estéticas, suas boas propriedades mecânicas e sua contribuição à sustentabilidade na construção.

Desde tempos pré-colombianos, o bambu tem sido utilizado como material de construção na América Latina, e mais recentemente tem-se desenvolvido com bastante sucesso em alguns destes países nesse âmbito. No entanto, é considerado um recurso florestal com pouca importância tanto na economia quanto na construção na maioria dos países latino-americanos. A Colômbia é o país da região que apresenta maior número de pesquisas e construções com bambu, especialmente o da espécie *Guadua*, tendo edificações e arquitetos mundialmente reconhecidos neste campo e normativa sobre o tema. O Equador e o Brasil têm favorecido a popularização e utilização do bambu nas edificações contemporâneas.

Nestas construções são utilizados, principalmente, os bambus lenhosos, tanto para os elementos estruturais quanto nas coberturas, pisos, vedações e outros componentes da edificação. Os bambus lenhosos são encontrados em quase todos os habitats da América Latina, com exceção das regiões desérticas. Estes estão distribuídos nas florestas úmidas desde o nível do mar até as terras altas dos Andes a 4.300 metros de altitude (JUDZIEWICZ *et al.*, 1999). A América Latina é uma região muito rica em termos de diversidade e número de espécies lenhosas de bambu. Das 1.100 espécies e 65 gêneros de bambus lenhosos conhecidas no mundo, 20 gêneros e 429 espécies de bambus lenhosos estão distribuídos desde o noroeste do México até o sul do Chile (JUDZIEWICZ *et al.*, 1999). Na região o Brasil possui a maior diversidade de bambu (137 espécies), seguido pela Colômbia (70), a Venezuela (60), o

Ecuador (42), a Costa Rica (39), o México (37) e o Peru (37) (LONDOÑO, 2001).

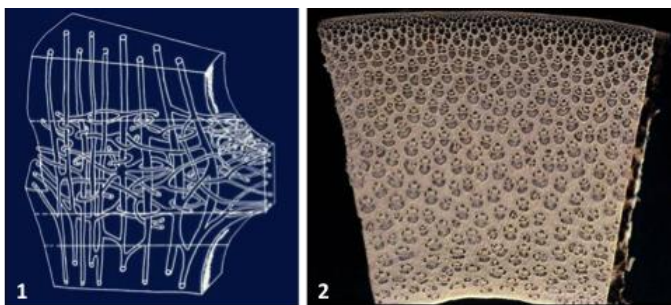
Segundo Londoño (2001), a área de florestas de bambu *Guadua* na Colômbia está estimada em 51.500 ha, dos quais 46.261 ha são florestas naturais e 5.260 ha são cultivadas. Com uma produção média de 1.000 colmos por hectare por ano, o total de produção para os estados do centro-oeste do país pode ser calculada em 20,3 milhões de colmos por ano, o equivalente a 911.745 toneladas por ano em condições verdes (45 Tons / ha), no entanto, no Brasil esses dados podem ser muito mais significativos uma vez que tem a maior floresta de bambu do continente. Deste modo, poder-se-ia encontrar no bambu uma boa alternativa para a solução dos problemas habitacionais e de infraestrutura institucional.

Deste modo, o bambu é um recurso alternativo para a construção, que contribui à proteção do meio ambiente e tem o potencial de ajudar a enfrentar alguns dos problemas de infraestrutura que afetam a maioria dos países latino-americanos. Ao mesmo tempo, o rápido crescimento do bambu, a variedade de usos e a facilidade de distribuição fazem deste um recurso renovável ideal para o desenvolvimento das economias locais.

### **2.1.1. Propriedades físicas do Bambu e fatores que as determinam.**

O bambu pode ser coletado quase pronto para seu uso na construção. O colmo de bambu tem uma geometria circular oca, composta de nós e entrenós. Nos entrenós, as fibras estão orientadas axialmente, enquanto nos nós ocorre uma intensa ramificação de fibras que se interligam transversalmente (figura 2). Esse diafragma que se forma nos nós fornece grande estabilidade estrutural e resistência ao elemento. A composição dos colmos de bambu é de cerca de 50% de parênquima (células presentes em todos os organismos vegetais que preenchem os espaços livres entre órgãos e tecidos), 40% de fibra e 10% de tecidos de condutos (vasos e tubos perfurados), com algumas variações de acordo com a espécie (LIESE, 1985). Uma seção

transversal de qualquer dos entrenós do colmo, mostra os feixes vasculares (figura 2). Na parte interior da parede do colmo os feixes são maiores e se apresentam em menor quantidade. Na zona periférica do colmo os feixes são menores e mais numerosos, fornecendo uma pele extremamente densa e dura. Esta camada exterior é geralmente muito lisa e semelhante a um verniz que fornece uma proteção eficaz aos produtos químicos e aos danos mecânicos.

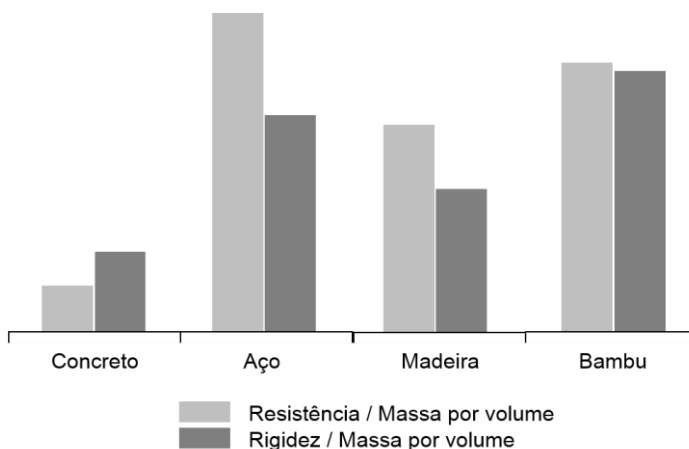


**Figura 2.** (1) Esquema da interligação das fibras que formam o diafragma na região dos nós. Disponível em: <http://bambusexperte.wordpress.com/> (2) Corte transversal da parede do colmo do bambu. Disponível em: <http://bambusexperte.wordpress.com/>

Ao considerar um material para uso estrutural, a primeira pergunta que se faz é sobre sua segurança. O bambu, pela estrutura anatômica já descrita, é um material extremamente forte e flexível que ainda é chamado de “aço vegetal”. O ótimo desempenho estrutural do bambu quanto à compressão, torção, flexão e, sobretudo quanto à tração é conferido pela sua volumetria tubular e pelos arranjos longitudinais de suas fibras. Usado do jeito correto é um material extraordinário, eficiente e seguro para concepção de estruturas.

Uma propriedade física importante do bambu é a densidade do material (massa x unidade de volume), que normalmente situa-se entre 700-900 kg/m<sup>3</sup>. Se for analisada a resistência e rigidez do bambu em relação à sua densidade, é

evidente que ele é um material único e muito eficaz para fazer estruturas, como mostrado na figura 3.



**Figura 3.** Comparação da resistência e rigidez em relação à densidade do bambu com outros materiais de construção. Fonte: Janssen (2000).

A idade é um fator importante para o desenvolvimento das propriedades de resistência. Geralmente um bambu maduro chega à sua resistência máxima em ao redor de três anos. Igualmente, o estado após o corte tem também grande importância em seu desempenho estrutural. Em geral, no estado seco, a resistência do bambu é maior do que no estado verde. Segundo Liese (1985), o teor de umidade tem uma grande influência na resistência como no caso da madeira.

O teor de umidade varia dentro do colmo sendo determinado por sua idade, pela estação de corte e pelas características da espécie. Colmos jovens, de um ano de idade, tem um teor de umidade relativa alta, perto de 120-130% quando comparado com os colmos maduros. Igualmente os colmos jovens apresentam maiores diferenças de umidade no interior do próprio colmo. Essas diferenças de umidade podem ascender a 25% da base para o topo, apresentando maiores níveis de

umidade na base. A estação de corte tem também uma grande influência sobre o teor de água do colmo, com um mínimo de umidade no final do período de seca, e um máximo na época das chuvas. Entre diferentes espécies o teor de umidade varia até mesmo na mesma localidade. Isto ocorre principalmente devido à variação na quantidade de células parenquimáticas, o que impacta bastante a capacidade de retenção da água.

O bambu começa a retrair desde o momento de corte, por causa da redução da umidade. O encolhimento afeta tanto a espessura das paredes do colmo quanto o diâmetro. A diferença do bambu maduro e em estado verde é cerca de 20% de teor de umidade, isso leva a uma contração de 4 a 14% da espessura da parede e de 3 a 12% do diâmetro (LIESE, 1985). As fibras do bambu encolhem essencialmente na direção radial e a deformação mínima ocorre na direção axial. Assim, colmos maduros retraem menos do que os imaturos. Esses fatores, idade e época de corte, são determinantes no desempenho estrutural do bambu e é muito importante levá-los em consideração no planejamento da construção.

## 2.2. POTENCIAIS DO USO DO BAMBU

Na base do presente trabalho está a preocupação com o grande aumento no consumo de recursos e as crescentes consequências ambientais dos processos relacionados com o ambiente construído. As atividades do setor da construção e aquelas relacionadas com o uso das edificações causam os maiores consumos de recursos, tanto de materiais quanto de energia. Estes recursos não são ilimitados, porém, com os atuais padrões de consumo e uma crescente população mundial, esses recursos estão se tornando cada vez mais escassos. Portanto, há uma necessidade de verdadeira mudança na gestão de recursos com base na utilização de recursos renováveis. O Bambu é uma das plantas de mais rápido crescimento e é um recurso natural renovável que poderia desempenhar um papel ainda mais importante do que já desempenha na utilização equilibrada dos recursos de uma sociedade

Graças à sua grande força, flexibilidade e versatilidade, colmos de bambu tem sido amplamente utilizados em habitação e para outros fins na construção. A seguir apresentam-se as principais vantagens e desvantagens de seu uso na construção

### **2.2.1. Características Ambientais**

Os colmos de bambu lenhosos alcançam sua altura máxima em até 6 meses de idade e, nas espécies tradicionalmente utilizadas na construção, como *Guadua Angustifolia* Kunth, pode chegar até 30 metros de altura (LONDOÑO et al., 2002). Desde um ano de idade pode ser utilizado na fabricação de tecidos, painéis, pisos, telhas, cabos e outros elementos da edificação; desde os 3 anos de idade podem ser usados como elementos estruturais. O rápido crescimento representa altas taxas de retorno e torna-o um material altamente renovável. Essa informação é mais significativa quando se leva em consideração que o rizoma da planta fornece um colmo a cada ano e a sua vez o rizoma do novo colmo fornece mais um colmo a cada ano, fazendo sua produção exponencial.

Além do rápido crescimento, o aproveitamento do bambu pode ser total. Além dos colmos, que possibilitam múltiplas aplicações, as folhas, os galhos e os resíduos do processamento industrial também podem ser utilizados como biomassa na geração de energia ou na alimentação de animais. Segundo Riaño et al (2002), além da alta contribuição do bambu na geração de biomassa, durante o crescimento da mata a absorção de CO<sub>2</sub> é muito significativa.

O trabalho de sequestro de carbono se dá porque a celulose e lignina, presentes no bambu, precisam grande quantidade de carbono para fazer o bambu crescer. Mas o efeito do sequestro de carbono será anulado se o bambu for usado como madeira combustível pois a queima irá liberar o carbono armazenado de volta ao ambiente. Utilizações de longo prazo, tais como edifícios e mobiliário, são ideais para assegurar que o carbono permaneça fechado durante um longo período.

Outra vantagem ambiental do bambu é o papel que desempenha como um meio para o controle da erosão, prevenção de deslizamento e reabilitação das terras (JANSSEN, 2000). O bambu cresce rapidamente, ainda em solos pobres, e em pouco tempo desenvolve uma extensa rede de rizomas e raízes, estabilizando o solo. Também a camada de biomassa, produto das folhas, protege o solo da erosão causada por chuvas tropicais fortes.

### **2.2.2. Versatilidade de uso na área da construção**

Na Ásia considera-se que o bambu acompanha às pessoas durante toda a vida. Assim como a planta tem múltiplos usos na vida diária, nos objetos e na alimentação, também tem diversos usos na construção. O bambu na construção é utilizado para estruturas, vedações, pisos, painéis, tecidos, telhados, dutos, cabos, etc. Além disso, tem a capacidade de ser misturado com outros materiais. Ainda, apesar dos diversos resultados, Hidalgo (2003) afirma que o bambu é a fibra natural mais usada experimentalmente como reforço do concreto, devido à sua elevada resistência à tração.

A seguir se apresentam alguns exemplos de edificações feitas com bambu ao redor do mundo. Entre os arquitetos e escritórios com ampla experiência e reconhecimento encontrassem o arquiteto colombiano Simón Velez o qual já fez obras em México, Alemanha, Colômbia, China, entre outros países, com bambu da espécie *Guadua*. Os escritórios 24H e Ibuku tem também várias edificações desenvolvidas principalmente na Ásia, entre elas edificações de até 5 pisos, como o Green School em Bali. (figura 4)





**Figura 4.** Imagens ilustrativas edificações com bambu (1) 24H-architecture. Disponível em: <http://www.designboom.com/architecture/24h-architecture-childrens-activity-and-learning-center-thailand/> (2-4) Edificações do escritório Ibuku. Disponível em: <http://ibuku.com/> (5-6) Edificações do arquiteto Simón Velez. Disponível em: <http://www.archdaily.co/co/02-265878/arquitectura-en-bambu-la-obra-de-simon-velez>

### 2.2.3. Desempenho estrutural

Embora sua reduzida massa específica aparente, o bambu é considerado um material de boa resistência mecânica. O bambu tem uma elevada resistência em relação ao peso, grande capacidade de absorção de energia e excelente flexibilidade (JANSSEN, 2000).

O desempenho mecânico do bambu depende de vários fatores como a espécie, a idade do colmo, o método de cura, o tratamento de preservação, entre outros. Mesmo assim na literatura (CARBONARI; ABE; HENRIQUE PEDROSA, 2012; GHAVAMI; MARINHO, 2005; JANSSEN, 2000) pode-se encontrar valores médios do desempenho do bambu submetido aos diferentes esforços, os quais são apresentados a seguir:

O bambu, das espécies *Guadua* e *Dedrocalamus* utilizadas nas estruturas de edificações, quando submetido a compressão paralela às fibras suporta tensões em torno de 50 MPa (aprox. 510 kgf/cm<sup>2</sup>). É importante salientar que o colmo tem similar resistência nesse tipo de esforço tanto em seções com ou sem nó. Esse valor evidencia uma maior resistência do bambu sendo comparado com o concreto ordinário quando são submetidos a esse tipo de esforço.

Em relação aos esforços à tração paralela às fibras o bambu tem seu desempenho mais significativo. A resistência apresentada pelo bambu neste tipo de esforços é elevada, ultrapassando valores de 200 MPa para algumas espécies. A resistência à tração é maior nas fibras exteriores do colmo. Na antiguidade, na Ásia, foram construídas pontes pênséis com tecidos trançados provenientes das camadas externas de colmos de bambu. Tais pontes tornaram-se exemplos de uma combinação de leveza e excelente resistência mecânica à tração (HIDALGO, 1981).

Para os esforços à flexão, os colmos têm bom desempenho e os valores ficam em torno de 62 MPa. Mas em relação ao esforço de cisalhamento paralelo às fibras pode-se dizer que é o ponto fraco do bambu, sendo uma condição importante a levar em consideração durante o planejamento das ligações dos elementos de uma estrutura. Quanto à torção as formas cilíndricas dos colmos favorecem seu desempenho nesse sentido.

Mesmo sendo evidentes as boas propriedades mecânicas do bambu, para os cálculos de engenharia estrutural é adequado ter dados particulares dos elementos a utilizar na construção. Tais dados podem ser deduzidos a partir de ensaios de uma amostra representativa quando seja possível. Os procedimentos podem ser feitos seguindo os critérios da *International Network for Bamboo and Rattan - INBAR*, que no ano de 2004 publicou a primeira norma ISO de bambu: a ISO 22157 para a determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu (2004). No entanto existem pesquisas que permitem estimar as propriedades mecânicas dos colmos de bambu em relação à sua massa por volume, para determinar tensões admissíveis. Janssen (2000) indica que podem ser usadas as seguintes regras para determinar as tensões admissíveis (N/mm<sup>2</sup>) do bambu seco ao ar:

- Compressão:  $0.013 \times 3 \times \text{massa por volume em kg/m}^3$ ;
- Flexão:  $0.020 \times 3 \times \text{massa por volume em kg/m}^3$ ;
- Cisalhamento:  $0.003 \times 3 \times \text{massa por volume em kg/m}^3$ .

Nessa linha, na Colômbia e no Peru já existe normativa para o uso do bambu na construção que estabelece valores de referência para o cálculo estrutural a nível local. No caso da Colômbia é o Título G da norma Colombiana de sismo-resistência NSR-10 (2010), e no Peru trata-se da Norma Técnica E.100 do Regulamento Nacional de Edificações (2012).

Finalmente cabe salientar que o bambu tem uma notável resposta diante de abalos sísmicos. Segundo Janssen (2000) no caso de um desastre como um furacão ou um terremoto, as tensões que recebe uma estrutura são multiplicadas quanto a circunstâncias normais. Em tais casos, as tensões em materiais como o aço podem se tornar o dobro da tensão admissível e entrar na área de falha. Já na madeira e especialmente no bambu isto não acontece, visto que esses materiais têm uma grande distância entre a tensão admissível e a tensão de ruptura. Isto significa que as estruturas de aço vão sofrer muito dano,

enquanto a maioria das estruturas de madeira ou bambu permanecerão em boas condições.

#### **2.2.4. Material econômico**

Lembrando que o bambu é uma “grama gigante” que tem um rápido crescimento, uma reprodução por rizomas e que não precisa de muita manutenção, é evidente que a produção de colmos é econômica. A produção precisa de um investimento inicial, relativamente baixo, pela conformação do plantio, mas o gasto é reduzido significativamente nos anos seguintes.

Como material de construção o bambu é econômico mesmo ainda tratado. No programa *“Grow your own house”* (Cresça a sua própria casa), da fundação ZERI, o arquiteto Simón Vélez (2000) confirmou a economia do material projetando uma habitação social de 65m<sup>2</sup>, feita de bambu Guadua. A casa requer apenas 100 peças de cinco metros de comprimento de bambu e podem ser colhidas em quatro a cinco anos em 500 m<sup>2</sup> de terreno. O custo da casa de dois andares, com cimentações de concreto, no ano 2000, construída em Calarcá, Colômbia, foi de apenas 8 milhões de pesos (pouco menos de \$ 4300 dólares).

### **2.3. LIMITAÇÕES DO USO DO BAMBU**

Por ser um material natural, o bambu apresenta variabilidade em sua forma, sua estética e em suas características físico-mecânicas, além de ter uma vida útil limitada por sua biodegradação. Como já foi mencionado, fatores como a idade, o teor de umidade, época de corte, o tratamento e outros, afetam o comportamento mecânico do material. Essa heterogeneidade formal do material na forma roliça deve ser levada em conta em seu desempenho estrutural, porém esteticamente sua rusticidade pode ser considerada como uma alternativa atraente.

Provavelmente a maior desvantagem a levar em conta seja sua vulnerabilidade ao ataque de insetos. A presença de amido

nas células parenquimáticas do colmo é o fator que provoca o ataque dos insetos, principalmente dos organismos xilófagos como o caruncho (*Dinoderus minutus*). Para prolongar a vida útil deste material orgânico e protegê-lo dos ataques de insetos, podem-se executar estratégias desde o planejamento do corte até sua manutenção na edificação. Segundo Narayanamurty (1972), é preferível efetuar o corte dos bambus, com níveis mais baixos de concentração de amido, que acontece na época da seca para diminuir as chances de ataques das pragas. Depois do corte, faz-se necessário o uso de tratamentos preservativos que podem ser realizados por métodos naturais e métodos químicos. Contudo, aplicando os adequados tratamentos é possível proteger os elementos de bambu contra o ataque de fungos e insetos e aumentar sua vida útil consideravelmente.

Finalmente outra desvantagem do material ligado a esse contexto regional é o preconceito. Na América Latina o bambu tem sido associado a obras provisórias ou relacionadas à pobreza e ainda continua sendo essa a percepção de uma grande parte da população. Isso pode ser um fator externo crítico para desconsiderar o uso do bambu num projeto. O bambu tem sido considerado a madeira dos pobres devido ao fato é um material abundante e à forma fácil e barata de obtê-lo, pelo qual ele tem sido utilizado em muitas regiões para construções de habitação de baixo custo.

No entanto, devido à tendência atual de crescimento da demanda por produtos eco-amigáveis na indústria da construção e o desenvolvimento de edificações bem sucedidas com sistemas construtivos não tradicionais, o bambu está gradualmente emergindo como um "ouro verde" para os produtores e construtores (GARCIA-SAENZ, 2012). Além disso, Garcia-Saenz (2012) afirma que tem acontecido uma mudança na cultura e no uso social do bambu. Classes mais altas, devido a bons projetos de arquitetura, agora apreciam o bambu e acreditam que ele tem muitas propriedades estruturais que outros materiais não têm, como o bom desempenho ante abalos sísmicos. O interesse dos arquitetos no bambu propõe uma importante contribuição para a mudança da percepção de

pobreza associada com edificações construídas com bambu. Um exemplo é o arquiteto colombiano Simón Vélez, que ganhou o prêmio *Prince Claus Award* em 2009 por sua contribuição para a arquitetura com o uso deste material. Vélez (2011) acredita que a associação do bambu com a pobreza pode ser mudada conforme mais arquitetos, como ele, constroem também edificações para as pessoas mais ricas utilizando o material.

Além disso, para consolidar o bambu como uma importante alternativa na construção e tirar a ideia negativa que tem relacionada, deve-se continuar desenvolvendo normativas tanto para os ensaios de caracterização do bambu, como a citada ISO 22157 para determinação das propriedades físicas e mecânicas, quanto para seu uso adequado na construção, como as normas locais da Colômbia (“Título G: Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.,” 2010) e o Peru (“Norma técnica E. 100 Bambú. Reglamento Nacional de Edificaciones,” 2012).

#### 2.4. TIPOS DE BAMBU UTILIZADOS COMO ESTRUTURA NA CONSTRUÇÃO

Neste item são apresentadas as espécies de bambu mais utilizadas nos elementos estruturais na construção, tanto por suas propriedades mecânicas como por sua ampla disponibilidade. As espécies que vão ser abordadas têm semelhanças em suas características físicas, seu desempenho estrutural, dimensões e estética. Segundo Londoño (2001), as espécies mais utilizadas na América Latina pertencem ao gênero *Guadua* e ao gênero *Bambusa* Asiático. As espécies a seguir são encontradas nas diversas regiões da América do Sul e podem, qualquer uma delas, ser utilizadas na proposta de projeto que será desenvolvida nesta dissertação. No entanto, dar-se-á maior importância às espécies do gênero *Guadua*, endêmicas da América do Sul.

A *Guadua* representa o gênero economicamente mais importante do Novo Mundo, com espécies atingindo alturas de 30 metros e colmos chegando a 21 cm de diâmetro. Também constitui a mais extensa floresta de bambu na América, cobrindo mais de 120.000 km<sup>2</sup> na bacia amazônica ocidental. A *Guadua* cresce naturalmente em quase todos os países da América Latina, desde San Luis de Potosí no México passando por todos os países da América Central e América do Sul, com exceção do Chile. A área mais diversificada encontra-se próxima do Brasil Central e do leste da Bolívia, com 30% da diversidade de espécies. Espécies de *Guadua* têm sido encontradas a partir do nível do mar até zonas localizadas a 2200 metros de altitude, sendo mais abundante e diversificada na faixa entre 0 a 1500 metros de altitude (LONDOÑO, 1996). A *Guadua* é originária do continente americano. Tem surgido como uma alternativa valiosa na solução dos problemas habitacionais na América Latina por muitos anos.

A ***Guadua Angustifolia Kunth* (GAK)**, caracterizada em 1822 pelo botânico alemão Carl Sigismund Kunth, é a espécie mais destacada dentro do gênero por causa de suas propriedades físico-mecânicas que a tornam um excelente material estrutural com grande potencial de desenvolvimento. Essa espécie tem um papel importante nas economias locais da zona cafeeira da Colômbia e na região costeira do Equador. Na mata, os colmos se caracterizam por sua cor verde escuro intenso com um anel cor branca nos nós. Os colmos madurados perdem essa cor intensa e se tornam mais claros (Figura 5). Destaca-se por causa do tamanho de seus colmos que podem medir até 30 metros de altura e apresentar diâmetros entre 12 a 15 centímetros, ultrapassando alguns elementos 20 centímetros de diâmetro. A espessura das paredes da zona média do colmo madurecido variam entre 10 a 15 milímetros. A GAK tem um crescimento de 11 a 21 cm por dia, atingindo sua altura final nos primeiros 6 a 7 meses e sua maturidade entre 4 a 6 anos de idade (LONDOÑO et al., 2002).

Estruturalmente a GAK tem sido um dos bambus mais utilizados no continente sul americano e no mundo, por muitos

anos, devido a sua disponibilidade e bom desempenho mecânico. Ghavami e Marinho (2005) afirmam que o módulo de resistência da GAK ocorre em função do diâmetro e à espessura da parede e varia ao longo do colmo, conforme as variáveis vão diminuindo de forma gradual em sentido ascendente. Quanto à normativa do uso estrutural, foram desenvolvidos, para essa espécie especificamente, o Título G da Norma Colombiana de Sismo Resistência (2010) na Colômbia, e a Norma Técnica E.100-Bambú do Regulamento Nacional de construção no Peru (2012).



**Figura 5.** (1) *Guadua Angustifolia* Kunt. Disponível em: <http://www.bambooinvitro.com/guadua-angustifolia> (2) *Guadua Chacoensis*. Disponível em: <http://www.bamboocostarica.com/Materia-Prima3.html>

Outra das espécies comumente utilizadas na construção é a ***Guadua Chacoensis*** (Figura 5). Essa espécie é originária da América, cresce naturalmente na Bolívia, Paraguai e norte da Argentina e por ser uma espécie resistente a baixas temperaturas também é encontrada no sul do Brasil. Esteticamente é muito similar à *Guadua Angustifolia* Kunth e seus colmos tem uma dimensão média de 20 metros de altura com diâmetros entre 8 a 15 centímetros (LONDOÑO; PETERSON, 1992).



**Dendrocalamus Giganteus** é uma espécie de origem Asiática com presença importante no Brasil. Geralmente as dimensões são maiores que as da Guadua, tanto em altura quanto no diâmetro dos colmos e na espessura das paredes (Figura 6). Pode alcançar 35 metros de altura e até 30 centímetros de diâmetro. Sua cor é verde grisalho, seu principal uso é na construção e, segundo Ghavami e Marinho (2005), tem melhor desempenho mecânico que a Guadua.

Finalmente a **Bambusa Vulgaris** é uma espécie tradicionalmente utilizada na construção, especialmente na Venezuela e uma das espécies de bambu mais cultivadas no Caribe (LONDOÑO, 2001). As dimensões desta são menores em relação às espécies citadas acima, com um diâmetro dos colmos de até 10 centímetros (Figura 6).



**Figura 6.** (1) *Dendrocalamus Giganteus*. Disponível em: <http://www.guaduabamboo.com/blog/dendrocalamus-giganteus> (2) *Bambusa Vulgaris*. Disponível em: <http://www.guaduabamboo.com/blog/bambusa-vulgaris>

## 2.5. APROVEITAMENTO DO BAMBU NA CONSTRUÇÃO

Visando garantir a resistência adequada do material quando usado na construção é preciso fazer um apropriado

processo de aproveitamento do bambu. A seguir se apresentam esses procedimentos de aproveitamento do bambu para a construção desde sua produção até os métodos de preservação.

### **2.5.1. Plantio e produção**

Em seu habitat natural, as plantas de bambu crescem a partir de sementes ou rizomas. A propagação vegetativa do bambu pode ser obtida por transplante total ou parcial do rizoma, por plantio de pedaços do colmo ou por semente. (Figura 7).

Enquanto a maioria das plantas são multiplicadas por sementes, o bambu é uma exceção. A propagação por semente é pouco utilizada por sua escassez. Em geral as plantas florescem pelo menos uma vez por ano para a produção de sementes, mas a maioria dos bambus florescem raramente, uma vez em um período que varia entre 15 e 100 anos (JANSSEN, 2000).

A propagação do bambu, por meio de segmentos do colmo ou estacas, é muito popular por ser um método rápido, simples, econômico e por não necessitar muito espaço. Esse processo é feito mediante o corte de pedaços do colmo ou dos galhos, chamados de propágulos e, em seguida, plantadas horizontalmente no solo. Depois de duas a três semanas, os novos brotos começam a crescer.

A propagação por rizoma se realiza por transplante parcial o total do sistema. O sistema de rizoma é muito importante para o bambu. Ele é um sistema subterrâneo complexo que fornece uma base à planta e que cresce permitindo à planta se estender. Cada ano um broto cresce do rizoma fornecendo uma nova parte do rizoma, que por sua vez vai gerar um novo broto no ano seguinte. Os rizomas se reproduzem dos rizomas e permanecem conectados entre si. Nesta interconexão, todos os indivíduos de um mesmo grupo são descendentes e clones do rizoma principal (JUDZIEWICZ et al., 1999). Assim, a reprodução da planta de bambu fornece novos colmos de maneira exponencial,

confirmando, ainda mais o caráter altamente renovável do material.



**Figura 7.** Métodos de propagação do bambu. (1) Sementes. Disponível em: <http://www.apuama.org/> (2) Segmentos do Colmo. Disponível em: <http://www.apuama.org/> (3) Rizoma. Disponível em: <http://www.cicap.org.pe/>

Após o surgimento do broto, o colmo atinge sua altura final nos primeiros 6 meses de idade. Nesse estágio é possível alterar a forma do colmo para secções quadradas ou triangulares, por meio de uma fôrma colocada no contorno do colmo (HIDALGO; DICKINSON, 2003). Esse processo é realizado tanto na produção de peças especiais para edificações ou em design industrial, apontando à otimização da produção de tiras para elaborar bambu laminado, (Figura 8).



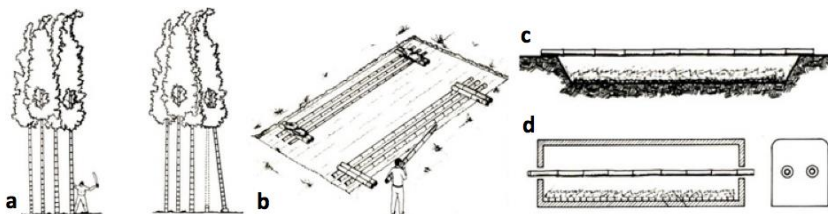
**Figura 8.** Bambu triangular e quadrado, imagens ilustrativas. Fonte: (1) Disponível em: <http://www.artbamboo.com.tw/> (2) Agência de notícias Universidade Nacional de Colômbia.

### 2.5.2. Cura e Preservação

Como já foi citado, a desvantagem principal do uso do bambu na construção é a vulnerabilidade ao ataque dos insetos. Igualmente, a durabilidade dos elementos, por biodegradação, é um tema a se levar em conta. Porém, existem procedimentos para proteger o bambu das pragas e prolongar sua vida útil.

A principal característica química do bambu é a presença do amido nas células parenquimáticas e essa presença é a causa do ataque de pragas, principalmente do caruncho. A camada externa do colmo fornece uma proteção e impermeabilização, porém nas camadas internas o número de células parenquimáticas é maior, fazendo com que o ataque do caruncho sempre comece nessa região. Portanto os tratamentos eficazes são realizados pelos extremos dos colmos após o corte.

Os procedimentos de preservação são iniciados desde o corte dos colmos, visando atuar no momento em que os níveis de concentração de amido são mais baixos, que está determinado pela idade do colmo e a época de corte (NARAYANAMURTY; MOHAN, 1972). O bambu deve ser cortado sempre a nível do primeiro ou segundo nó, para evitar que o rizoma apodreça por estanqueidade da água no restante do colmo. Após o corte podem ser realizados tratamentos naturais ou químicos de acordo à espécie e seu uso posterior. Hidalgo (1981) estabelece os seguintes **tratamentos naturais de cura**, (Figura 9):



**Figura 9.** Tratamentos naturais. (a) Cura na mata. (b) Cura por imersão na água. (c) Cura por calor. (d) Cura pela fumaça. Fonte: Hidalgo (1981)

a. **Cura na mata.** Os colmos de bambu após cortados são deixados em pé na própria touceira isolados do solo, sem aparar seus galhos. Por transpiração das folhas o amido é eliminado pela base do colmo. Neste procedimento os colmos conservam melhor suas características estéticas.

b. **Cura por imersão na água.** Os colmos são imersos na água visando reduzir ou eliminar o teor de amido existente. Este sistema tradicionalmente é bastante utilizado, porém não é muito eficaz, pois pode alterar suas características estéticas e mecânicas.

c. **Cura por calor.** Consiste em submeter os colmos recém cortados ao aquecimento com fogo direto, visando eliminar a seiva por exsudação. No entanto, o tratamento tem risco de gerar retrações no material provocando fissuras.

d. **Cura pela fumaça.** Os colmos, após o corte, são submetidos à ação direta da fumaça, a qual os torna enegrecidos. Devido à ação do calor e da fumaça, o amido é degradado quimicamente tornando-o menos atraente ao caruncho.

Algumas espécies de bambu são mais propensas ao ataque de fungos e insetos e os tratamentos químicos são geralmente mais eficientes que os naturais nesse sentido. Se o bambu será usado na construção de edificações, os métodos químicos de preservação são inevitáveis. O tratamento químico garante uma vida mais longa para o bambu. Pode ser administrado utilizando uma variedade de produtos, dependendo da condição do colmo (verde ou seco) e da finalidade para a qual o material vai ser utilizado.

Mesmo que exista uma grande variedade de produtos que garantem a preservação dos elementos, deve ser levado em conta o fator ambiental, pois alguns desses produtos químicos

podem ocasionar problemas de saúde ou danos ao meio ambiente.

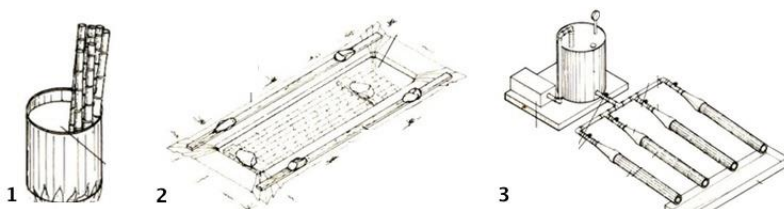
“[...] É melhor evitar conservantes com produtos químicos como o arsênico, pois eles representam um risco para o meio ambiente, bem como para a saúde das pessoas que efetuam a manipulação. Produtos químicos eficazes e seguros são baseados no elemento de boro, tal como o cobre-cromo-boro (CCB). Produtos químicos como ácido bórico, bórax e boro são baratos e eficazes. Boa preservação foi obtida na Costa Rica com um fertilizante à base de boro - *tetrahydrate dissódico octaborate* (fórmula química  $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), com 66% de teor de boro ativo. Uma grande vantagem do uso deste produto químico é que não tem nenhum desperdício. Uma vez que tem sido usado no processo de preservação repetidamente e misturado com o amido do bambu, pode ser aproveitado como um fertilizante” (JANSSEN, 2000).

Os produtos preservativos solúveis em água são constituídos pela associação de vários tipos de sais como o sulfato de cobre ou de zinco; dicromato de sódio ou de potássio; ácido bórico ou crômico. Na bibliografia relacionada com o tema se faz evidente que os produtos mais utilizados neste tipo de tratamento são a base de boro (JANSSEN, 2000; JAYANETTI; FOLLET, 1998; KUMAR; DEV, 1994). A combinação do ácido bórico e o bórax em uma relação de 1:1.5 é composta pelo sal alcalino chamado de *tetrahydrate dissódico octaborate* ou Tim-Bor no mercado. Este produto é solúvel na água com uma concentração de 4 a 5% e é o produto mais utilizado para preservar o bambu que é usado na construção.

As soluções aquosas podem ser aplicadas por métodos de imersão ou por pressão. O processo de imersão podem ser: **Imersão parcial** da base do colmo. Neste caso colocam-se, em posição vertical, os colmos recém cortados com a base imersa

na solução preservativa. Esse procedimento não é muito eficaz em colmos com comprimentos maiores de 4 metros. Porém, pode ser aproveitada a transpiração das folhas do bambu para obter melhores resultados. Realizando o processo de cura na mata, explicado anteriormente, mas mergulhando a base do colmo na solução preservativa (HIDALGO, 1981). O procedimento de **imersão total** das peças de bambu é realizado ao colocar as peças de bambu imersas em posição vertical na solução preservativa. No processo de imersão total o amido do colmo é substituído pela solução.

Finalmente o tratamento por pressão é realizado em colmos recém cortados por meio do método **Boucherie simples** (por gravidade) e o método **Boucherie modificado**. No primeiro, a solução preservativa é colocada num recipiente que se conecta ao extremo do colmo por meio de um tubo de borracha. Ao colocar o recipiente mais elevado do que o bambu, a solução passa através do colmo por gravidade, penetrando nos elementos anatômicos do bambu, principalmente nos grandes vasos das camadas internas da parede do colmo. O método Boucherie modificado é similar ao anterior mas o recipiente que contém o líquido deve ser fechado enquanto uma bomba de ar fornece pressão na solução. Esta penetra através do colmo substituindo a seiva e eliminando-a em direção à extremidade oposta à conexão. A solução utilizada nesse processo pode ser reutilizada. Esse processo pode levar entre 30 e 60 minutos usando pressões de 2 kg/cm<sup>2</sup> (HIDALGO, 1981; JANSSEN, 2000; KUMAR; DEV, 1994), (Figura 10).



**Figura 10.** Tratamentos químicos. (1) Imersão parcial. (2) Imersão total. (3) Método Boucherie modificado. Fonte: Hidalgo (1981)

Depois dos processos de preservação, naturais ou químicos, o bambu deve passar por um processo de secagem. Este processo é feito para reduzir o teor de umidade até aproximadamente 10 a 15%, com o intuito de estabilizar as mudanças dimensionais do material e aumentar sua resistência mecânica. A secagem das peças de bambu pode ser feita ao ar livre e pode levar de 6 a 12 semanas dependendo do conteúdo inicial de umidade e a espessura da parede (KUMAR; DEV, 1994). As peças podem-se secar em pé ou horizontalmente garantindo boa ventilação e afastamento do solo.

A secagem de bambu ao forno não é muito comum pois representa um risco elevado de rachaduras nas peças roliças, pela exposição às altas temperaturas, além de deformações e manchas. Contudo, pode ser um processo adequado para a secagem de peças não roliças de bambu como esterilhas ou tiras (KUMAR; DEV, 1994).

## 2.6. UTILIZAÇÃO DO BAMBU NA ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO.

Como já foi mencionado, o bambu pode ser utilizado em muitos elementos da edificação, como na estrutura, coberturas, pisos, paredes divisórias, vedações, etc. Na fabricação desses elementos pode ser usado em muitas formas e estados. A seguir vai ser descrita a forma de utilização do bambu em diferentes estados, principalmente na forma roliça e as diversas maneiras de realizar ligações das peças.

### 2.6.1. Sistemas construtivos e ligações com bambu em estado roliço.

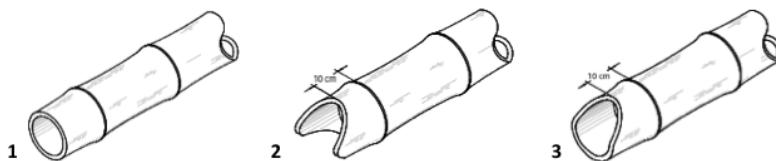
O bambu roliço é a forma natural do colmo e é nessa condição, que o bambu é mais utilizado como elemento estrutural, mesmo que seja usado, também em vedações e telhados. Não é necessária a utilização de equipamentos especiais para sua produção como material de construção, por conseguinte é um componente barato. No entanto, por ser um



elemento natural suas possíveis dificuldades radicam na irregularidade de sua forma e diversidade dimensional das peças. Seu uso mais destacado é nos componentes estruturais de edifícios e pontes e sua condição natural pode fornecer um aspecto estético atraente, quando bem executado. No entanto, não interessa utilizar um material com características mecânicas extraordinárias se não se consegue fazer com que as ligações transmitam os esforços de uns elementos para os outros de maneira eficiente. Por isso, estas são partes da estrutura que requerem especial desenvolvimento (SOUSA, 2013). As ligações tanto entre peças quanto com outros elementos e materiais são o grande desafio na construção com bambu roliço, isto principalmente pelo facto do bambu ser um material natural e portanto sem medidas uniformes.. A função principal das ligações é garantir a continuidade estrutural entre os elementos, transmitindo as forças de uma maneira segura evitando as deformações. Como princípios básicos, Hidalgo (1981) recomenda, além do uso de colmos adultos, secos e em bom estado, tentar realizar as ligações o mais próximo ao nó dos colmos e não utilizar pregos, que produzem rachaduras no colmo.

Para realizar as ligações os extremos do colmo devem ter cortes específicos de acordo com a amarração que vai ser feita. No “Manual de construção com bambu”, Hidalgo (1981) faz uma completa recopilação de usinagem das peças, as ligações encaixadas e com amarres (Figura 11).

Os cortes mais utilizados nos sistemas construtivos com bambu são o corte reto, o corte boca de peixe e o bico de flauta. Esses cortes permitem fazer encaixes entre colmos, ao mesmo tempo que suportam elementos e são complementados com amarrações, parafusos ou outros sistemas de ligação.

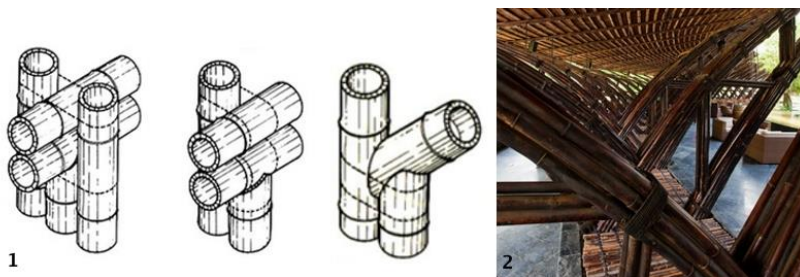


**Figura 11.** Cortes mais recorrentes no Bambu na construção.

(1) Corte reto. (2) Corte boca de peixe. (3) Corte bico de flauta.

Neste trabalho são definidos os **sistemas tradicionais de construção com bambu** aqueles que são empregados no mundo há muitos anos - séculos em alguns casos - e utilizam amarrações, pinos e parafusos nas ligações.

As ligações tradicionais com amarrações têm sido feitas com fibras naturais, couro, arame ou nylon, procurando ainda o encaixe das peças e a utilização de pinos (Figura 12). Os sistemas que utilizam amarrações são pouco usados na atualidade em edificações permanentes, pois a vida útil destes é muito limitada.

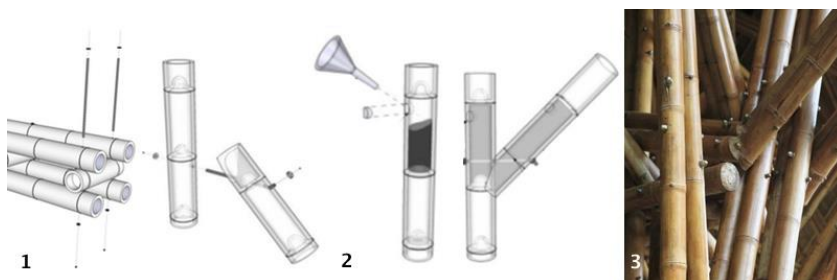


**Figura 12.** Ligações com amarrações, imagens ilustrativas. Fonte:

(1) Hidalgo, 1981. (2) Vo Trong Nghia Architects, 2009.

As ligações parafusadas são muito utilizadas por se tratar de uma alternativa barata, eficiente que não compromete a estabilidade do colmo. A ligação é feita usando parafusos ou barras rosqueadas, tanto no sentido transversal, quanto no longitudinal. O Arquiteto Colombiano Simón Vélez, desenvolveu

a ligação com injeção de concreto nos entrenós dos segmentos parafusados. Esta ligação é citada na bibliografia como ligação Vélez, tendo atribuído excelente desempenho estrutural (Figura 13). O concreto nas cavidades do colmo oferece maior resistência nas ligações.



**Figura 13.** Ligações parafusadas, imagens ilustrativas. (1) Ligação parafusada simples. (2) Ligação Vélez. Fonte: (1 e 2) Norma Técnica E.100, Peru (2012). (3) 24H Architecture (2009)

Na atualidade os sistemas construtivos com ligações parafusadas são os mais utilizados ao redor do mundo. Tem muitas vantagens, pois são sistemas baratos, não precisam de materiais e ferramentas especializados, são sistemas leves comparados com os de alvenaria e apresentam boa resistência estrutural. No entanto apresentam desvantagens, como todos os sistemas construtivos. Esses sistemas devem ser executados in situ; pois na maioria dos casos não permite a pré-montagem de elementos estruturais; precisa manutenção permanente e apresenta recorrentemente patologias por rachaduras nos pontos de fixação. Igualmente a mão de obra deve ter conhecimentos especializados neste tipo de construções.

As ligações que utilizam parafusos e barras rosqueadas tem muitas versões e variações. Simón Velez, por exemplo, desenvolveu uma ligação utilizando concreto e barras no sentido longitudinal do colmo, as quais são fixadas em apoios articulados. O reconhecido pavilhão Zeri, apresentado por Velez na Expo Hannover no ano 2000, utiliza essa técnica. Na época foi considerado como a maior edificação feita em bambu. A diferença da madeira, que produz elementos maciços os quais

resistem bem à compressão e podem ser utilizados pregos como fixação rápida, o bambu tem maior dificuldade com suas ligações. Portanto, o uso de concreto nos entrenós ajuda a evitar o achatamento do colmo. O carpinteiro alemão Jörg Stamm, que foi aluno de Velez, realiza ligações tradicionais parafusadas mas as reforça com parafusos transversais colocados em forma de espiral e preenchendo os entrenós de concreto. Com essa técnica já fez edificações de grandes distancias entre apoios, especialmente pontes (Figura 14).



**Figura 14.** Pavilhão Zeri por Simón Velez (2) Ponte na Colômbia por Jörg Stamm. Disponível em: <https://bambusexperte.wordpress.com>

Enquanto nos sistemas tradicionais e mesmo na maioria das estruturas parafusadas, são baseados em sistemas bidimensionais, os sistemas modernos experimentam com estruturas tridimensionais, como malhas espaciais e superfícies de dupla curvatura. Essas estruturas tem demandas estruturais de esforços pontuais e, em alguns casos, não lineares que devem ser resolvidos nas ligações.

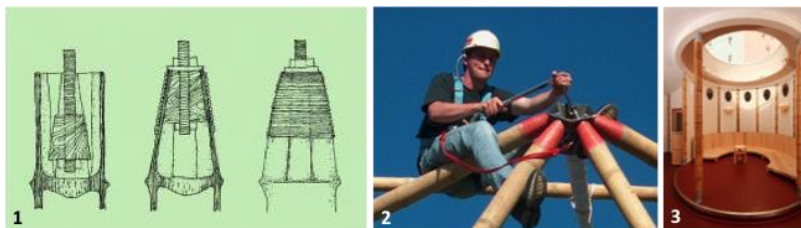
No geral, esses tipos de ligações utilizam peças projetadas especificamente para o elemento de bambu, tentando aproveitar as vantagens de resistência mecânica do colmo em relação ao tipo de estrutura a desenvolver, principalmente sua resistência à tração. O maior desafio deste tipo de ligação é conseguir a compatibilidade do bambu com outros materiais de construção.

Uma ligação que utiliza peças metálicas é a proposta por Waldemar Rothe (SOUSA, 2013) que trabalha abraçando as canas de bambu e mantendo ela em sua posição com angulo de  $90^\circ$  entre as canas. Usualmente este tipo de ligação é utilizada em canas pequenas e medias, no entanto seu conceito pode ser aplicado em estruturas maiores. (figura 15)



**Figura 15.** Ligação desenvolvida por Waldemar Rothe. Fonte: SOUSA, 2013.

C.H. Duff, no ano de 1941 (MINKE, 2012), desenvolveu uma ligação cônica que aproveita a resistência à tração do bambu poupando o uso de pregos e parafusos. A ligação consiste em fazer cônicos os extremos do colmo por meio de cortes de forma triangular colocando um elemento tipo barra no sentido longitudinal do colmo. A ponta do bambu é fechada com arame deixando um elemento de madeira no interior que vai fixar a barra. Baseado nesse conceito, Christoph Tönges e a empresa europeia Conbam, desenvolveram a ligação Conbam que tem uma peça terminal rosqueada e utiliza cabo de fibra de vidro com resina de poliéster para fechar o extremo do colmo (Figura 16).



**Figura 16.** (1) Ligação desenvolvida por Duff. Fonte: MINKE, 2012  
 (2) Ligação Conbam (3) Ligação Conbam na *Feng Shui House*  
*Germany*. Fonte (2-3) Disponível em: [www.conbam.de](http://www.conbam.de)

Uma ligação similar é utilizada pela empresa norte-americana Koolbamboo e a empresa colombiana Guaduatech. Na maioria dos casos a ligação tipo Conbam tem um terminal rosqueado pelo qual utiliza conectores metálicos ou a esfera Mero, (Figura 17). A boa resistência mecânica da ligação e suas possibilidades formais tem gerado uma ampla difusão desse sistema no mundo, mas são conhecidas ainda edificações leves tipo domos, geralmente para instalações temporárias. Esse sistema de ligação é utilizado por Saint Val, no desenvolvimento de um edifício conceito de cinco andares, no entanto esquematiza conectores específicos para o projeto (Figura 18).



**Figura 17.** (1) Esfera Mero Disponível em: <http://www.laefsl.com/>  
 (2) Ligação Koolbamboo. Disponível em:  
<http://www.koolbamboo.com/> (3) Ligação Guaduatech. Disponível  
 em: <http://www.guaduatech.com/>



**Figura 18.** Imagens ilustrativas edifício conceito desenvolvido por Saint Val. (1) Detalhe da ligação (2) Conceito edifício (3) Conceito agrupação. Disponível em:

<http://www.evolo.us/architecture/bamboo-housing-for-haiti-laurent-saint-val/>

Os sistemas baseados no conceito de Duff tem grandes vantagens. São sistemas esteticamente muito atraentes, possibilita a pré-montagem de elementos. É possível personalizar o conectores conforme a necessidade da estrutura. Além disso, são sistemas leves em relação aos sistemas de alvenaria, e ainda em relação aos sistemas de ligações parafusados; no entanto em alguns casos, o terminal e os conectores utilizados podem ser mais pesados comparados com o sistema parafusado. Poupando o uso de pregos e parafusos que perfuram as paredes do colmo, evitam-se patologias por rachaduras além de aproveitar a mais notável característica mecânica, seu desempenho à tração.

Outras ligações modernas tem sido desenvolvidas por diversos profissionais da construção. O arquiteto japonês Shoji Yoh e o italiano Renzo Piano desenvolveram ligações para construção com bambu baseado no uso de peças metálicas e parafusos. Tim Obermann, da Universidade Tecnológica de Berlim, desenvolveu, na Universidade Nacional da Colômbia em Medellín, uma ligação utilizando um cilindro metálico com terminal cônica. O cilindro foi fixado ao bambu *Guadua* de 12 centímetros de diâmetro atravessado por 6 parafusos em espiral. A ligação, que utiliza esferas Mero como conectores, teve resistência a esforços no sentido axial, de compressão e tração,



até 60 kN nos ensaios de laboratório, garantindo 30 kN para seu uso estrutural sem deformação do terminal cônico (Figura 19).



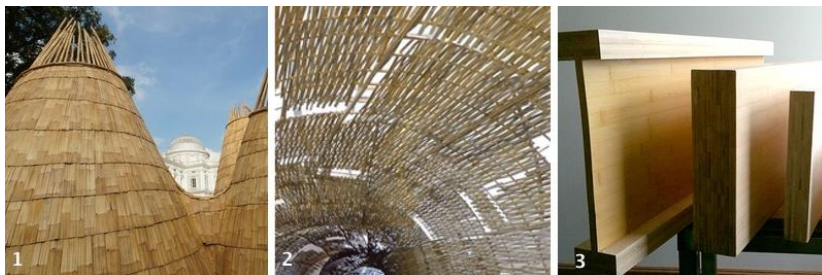
**Figura 19.** Ligações modernas, imagens ilustrativas. Fonte: (1) Tim Obermann, 2004 (2) Shoei Yoh, 1989 (3) Renzo Piano, 1997

As ligações modernas fornecem diversas possibilidades formais e uma estética interessante, no entanto, podem ter custos muito elevados. Mesmo assim representam uma grande evolução na construção com bambu. No desenvolvimento de ligações, obtiveram-se resultados muito satisfatórios na utilização de peças metálicas, no entanto se faz necessária a análise da finalidade de uso da estrutura para verificar a viabilidade econômica deste tipo de ligações (CARDOSO, 2000).

### **2.6.2. Outros elementos de bambu utilizados na construção**

O bambu também é utilizado na construção em outras formas ou estados além do colmo roliço. As esterilhas de bambu são obtidas por meio da abertura longitudinal do colmo, entre 2 a 3 anos de idade, formando tabuas e tirando a camada interna da parede do bambu para evitar que seja atacado por insetos (HIDALGO, 1981). As esterilhas são muito usadas na construção de vedações, paredes (Taipa de mão), forros ou como suporte para o telhado (Figura 20).





**Figura 20.** Formas de uso do bambu na construção. (1) Esterilhas.

Fonte: Eko Prawoto, 2013. (2) Tiras. Fonte: Eko Prawoto, 2013. (3)

Bambu Laminado Colado-BLC. Disponível em:

[criaarquitetura.blogspot.com.br/2010/01/laminados-de-bambu.html](http://criaarquitetura.blogspot.com.br/2010/01/laminados-de-bambu.html)

As tiras de bambu são peças obtidas pela divisão, em 4 ou mais partes, do colmo no sentido longitudinal. Elas são usadas na construção de paredes, painéis, tecidos e para fabricação de elementos de bambu laminado colado, entre outros. As tiras também podem ser usadas, variando sua espessura, como reforço para outros materiais de construção como o concreto. As tiras mais finas da camada exterior do colmo são utilizadas na produção de tecidos e cabos trançados. Tanto o procedimento de obtenção de esterilhas quanto de tiras deve ser feito com colmos verdes (HIDALGO, 1981).

Por meio da usinagem das tiras de bambu é possível fabricar peças ou painéis de Bambu Laminado Colado (BLC). O processo é realizado da mesma forma que com outras madeiras. As tiras de bambu usinadas são coladas com colas sintéticas ou ainda naturais e depois prensadas formando painéis. Esses produtos podem ser usados na estrutura do edifício em pisos, vedações e muitos outros elementos. Flander e Rovers (2009) corroboraram que uma casa de 175 m<sup>2</sup> de área, feita com painéis de bambu laminado, pode ser construída a partir de 1 hectare de floresta de bambu a cada ano (para o caso da Guadua Angustifolia Kunth), deixando ainda uma grande quantidade de material de bambu para ser utilizado em produtos secundários.



### **3. METODOLOGIA**

O presente trabalho constituiu um estudo exploratório que visou desenvolver uma ligação para construção com bambu, principalmente para elementos estruturais mediante uma exploração formal e verificação científica no laboratório. Igualmente o estudo teve uma fase de pesquisa aplicada mediante o desenvolvimento de um protótipo em escala natural com o intuito de comprovar a aplicabilidade da ligação desenvolvida.

O processo metodológico esteve dividido em quatro etapas. A seguir são descritas as etapas e os procedimentos realizados para se atingir cada um dos objetivos específicos.

#### **3.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Na primeira etapa foi realizada a fundamentação teórica da pesquisa mediante o levantamento bibliográfico e estudos de caso de ligações e edificações feitas com bambu. Assim, foram pesquisados temas relacionados com as características do bambu, suas propriedades físicas, os processos de aproveitamento, seu uso na construção e a normativa existente para construção com bambu Guadua. A base teórica foi importante na definição de processos no desenvolvimento formal dos elementos de ligação e sua compatibilidade funcional com o bambu Guadua.

#### **3.2. DESENVOLVIMENTO DA LIGAÇÃO**

Na segunda etapa foi realizado o processo de desenvolvimento da ligação. Neste processo foram definidas inicialmente as características que os elementos de ligação deviam atingir, após, foram definidos formal e funcionalmente os elementos que compõem a ligação e suas possibilidades de conformação de estruturas e elementos arquitetônicos. Também foi feito a análise de resistência estrutural da ligação no laboratório e finalmente uma análise econômica dos elementos desenvolvidos. A seguir se detalham os procedimentos metodológicos na etapa de desenvolvimento da ligação:

### **3.2.1. Definição dos parâmetros**

A ligação e os elementos que a compõem, deviam garantir, além do seu desempenho estrutural, atender outros parâmetros como sua eficiência econômica, valor estético, versatilidade, entre outros aspectos. Portanto, baseado nos processos de designs de produtos foi elaborada uma tabela com as expectativas e exigências que a ligação devia garantir, determinando parâmetros enquanto à produção dos elementos que compõem a ligação, sua execução na obra e seu desempenho funcional e estrutural, visando evitar patologias e possibilitar configurações formais não tradicionais. Igualmente o funcionamento das peças durante a vida útil da construção foi levada em conta planejando a manutenção do sistema de ligação, além do valor estético das peças no conjunto estrutural.

### **3.2.2. Definição dos elementos que compõem a ligação**

Nesta etapa foram definidos aspectos formais e produção dos elementos que compõem a ligação. A fundamentação teórica teve uma importância relevante, pois o foco de design da ligação proposta foi aproveitar as propriedades físicas do bambu *Guadua* além de evitar as possíveis patologias que as ligações podem ocasionar ao colmos de bambu. Assim, foram definidas inicialmente, as partes ou peças que compõem a ligação e definida uma denominação para cada uma delas, tendo nesse processo como elemento principal o “terminal” da ligação.

Nesta fase o foco esteve na definição formal do terminal e o processo de montagem no bambu, levando em consideração o atendimento das normas para esses elementos. Portanto, a norma de construção NSR-10 da Colômbia, no título G para construções de madeira e *Guadua*, e as pesquisas consultadas da taxonomia da GAK, foram referência para definir os materiais e dimensões dos elementos da ligação.

Contudo, foi resolvido produzir duas tipologias do terminal para a ligação, com o intuito de fazer comparações do desempenho estrutural e econômica entre as duas. Finalmente, foram feitas análises dimensionais e representações dos elementos da ligação mediante programas computacionais em 2D e 3D, estabelecendo a forma, dimensões, espessuras e materiais dos componentes desenvolvidos.

### **3.2.3. Possibilidades formais e arquitetônicas da ligação**

Os modelos tridimensionais foram utilizados nesta etapa para simular as possibilidades de configuração de diferentes elementos arquitetônicos que poderiam ser construídos com a ligação proposta. Por meio dos programas Sketchup Pro 8 e Vray 2.0 foram modelados os elementos de ligação desenvolvidos e simuladas distintas configurações formais de estruturas e vedações de bambu utilizando a ligação desenvolvida.

A análise de elementos arquitetônicos permite conhecer as possibilidades compositivas do uso da ligação, quantificar os componentes utilizados evitando o desperdício, definir processos construtivos e evitar patologias. Nesta fase são apresentadas as possibilidades de uso da ligação para configurações tradicionais de colunas, vigas, treliças e outros. Assim como também para elementos não tradicionais como estruturas e vedações curvas, inclinadas, para cúpulas, abobadas e domos.

### **3.2.4. Análise do desempenho estrutural da ligação**

Após definir as dimensões, bitolas e material dos elementos que compõem a ligação foram feitos ensaios de laboratório para determinar a resistência da ligação e fazer ajustes nas mesmas, se necessário.

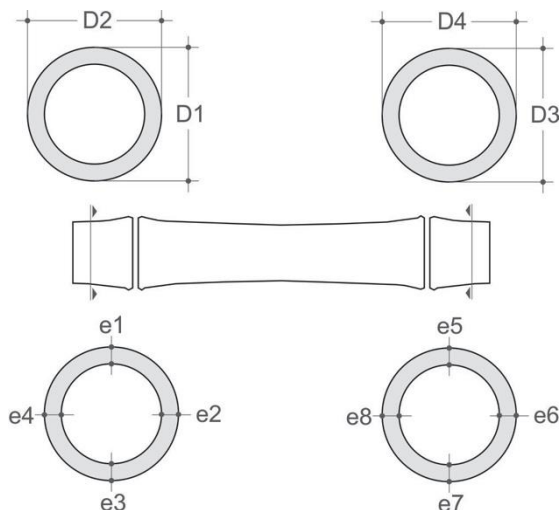
Os corpos de prova foram feitos com secções de colmo, de 45 cm de comprimento na média, de bambu GAK, garantindo a presença de uma seção completa de entrenó e dois nós. Para os

ensaios de laboratório foi utilizado bambu *Guadua Angustifolia* Kunth com as especificações para construções fornecidas pela norma NSR-10 da Colômbia. Assim, os colmos utilizados nos ensaios tiveram as seguintes características:

- Corte em idade madura ao redor de 4 anos;
- Tratamento de preservação por imersão com produtos à base de Boro;
- Secagem em forno automatizado, garantindo conteúdo de umidade de 12% (+-3%);
- Acabamento exterior polido.

Os dados dos colmos utilizados nos ensaios foram obtidos da seguinte maneira:

- Comprimento do colmo entre os extremos.
- O diâmetro do colmo é obtido da média das dimensões dos diâmetros nos eixos *x* e *y* num plano paralelo ao corte do colmo. A média é obtida de 4 dimensões, 2 por cada extremo do colmo, (Figura 19).
- A espessura das paredes do colmo é obtida da média da espessura de cada seção no sentido *x* e *y* num plano paralelo ao corte do colmo. Quatro dimensões de cada extremo do colmo fornecem a média da espessura da amostra, (Figura 21).



**Figura 21.** Imagem ilustrativa da obtenção de dados de diâmetro e espessura de parede dos colmos.

No laboratório de estruturas da Universidade Nacional da Colômbia em Medellín, foram realizados ensaios de resistência a esforços no sentido axial em corpos de prova de bambu Guadua com o sistema de ligação proposta. Foi utilizada, para os ensaios, uma prensa universal PINZUAR automatizada de 1000 kN de capacidade disponibilizada no laboratório.

Para os corpos de prova submetidos à tração foram colocadas duas peças terminais da ligação desenvolvida, uma para cada extremo do colmo. Para os corpos de prova submetidos à compressão foi colocada um sistema de ligação com peça terminal num extremo do colmo no qual foi aplicada a pressão. Nenhum dos corpos de prova foram preenchidos com concreto no entrenó, visando conhecer a resistência da ligação nessa condição.

Nos ensaios, a ligação desenvolvida foi submetida a esforços, de compressão e tração, para duas tipologias da peça terminal em duas configurações diferentes. A primeira tipologia de terminal foi denominada L25mm-P9,5mm(3/8"), a qual

representa que o elemento tem largura de 25mm e perfurações na zona de conexão de 9,5mm (3/8") de diâmetro. A segunda tipologia de terminal, maior do que a primeira, foi denominada L38mm-P12,5mm(1/2"), a qual resume que o terminal tem largura de 38mm e perfurações na zona de conexão de 12,5mm (1/2") de diâmetro.

No ensaio de esforço axial à tração foram testados quatro corpos de prova, os dois primeiros com a terminal da tipologia L25mm-P9,5mm(3/8"), um deles com um terminal linear e o outro com dois terminais em cruz em cada um dos extremos do colmo. Os outros dois corpos de prova tinham o sistema de ligação com o terminal da tipologia L38mm-P12,5mm(1/2"), um corpo de prova com um terminal em cada um dos extremos e outro corpo de prova com dois terminais em cruz em cada extremo do colmo. No ensaio de esforço axial a compressão foram testados igualmente quatro corpos de prova, dois deles utilizando o terminal da primeira tipologia, um terminal só e dois terminais em cruz respectivamente. Os outros dois corpos de prova utilizaram a mesma configuração de terminais (um linear e dois em cruz) mas com terminais da tipologia L38mm-P12,5mm(1/2").

Na tabela 1 é apresentado o resumo dos ensaios realizados.

**Tabela 1.** Resumo dos ensaios de laboratório aplicados à ligação.

Variáveis dos ensaios			Número de ensaios
Tipos de esforço	Tipologias do terminal	Configuração dos elementos da ligação	
Compressão	L25mm-P9,5mm(3/8")	Linear	
Tração	L38mm-P12,5mm(1/2")	Em cruz	
2	2	2	8



Com os ensaios de laboratório foi pretendido validar se a ligação atende aos valores mínimos exigidos de resistência para ser utilizada na construção de estruturas. Os resultados foram comparados com os valores de referência que a norma NSR-10, da Colômbia, fornece para o cálculo de estruturas com GAK. Assim, os valores de resistência fornecidos pela prensa em kN foram convertidos a MPa e calculado o percentagem de conformidade em relação à norma de referencia.

### **3.2.5. Análise econômica da ligação**

A fase final da segunda etapa concernente ao desenvolvimento da ligação foi uma análise econômica da mesma, na qual fez-se um orçamento dos elementos e do custo da sua fabricação. A análise econômica realizou-se com o intuito de verificar o atendimento de um dos principais parâmetros da ligação: o baixo custo e a possibilidade de produção industrial dos elementos que a compõem.

## **3.3. PESQUISA APLICADA. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.**

O objetivo da terceira etapa do trabalho foi comprovar a aplicabilidade da ligação desenvolvida por meio da concepção e execução de um protótipo de caráter experimental a escala natural. Assim, foi feito o projeto e caracterização do sistema construtivo do protótipo e a construção de uma parte relevante da estrutura. O capítulo da pesquisa aplicada é apresentado no apêndice A, após as considerações finais da pesquisa.

### **3.3.1. Desenvolvimento do projeto de edificação**

A primeira etapa consistiu no desenvolvimento do projeto de edificação de um espaço multifuncional, no qual pudessem ser desenvolvidas distintas atividades comunitárias como sala de aula ou que pudesse ser utilizado como local de armazenamento. O projeto foi focado nas possibilidades formais da ligação pelo

qual foi concebida uma estrutura não convencional com elementos estruturais inclinados.

Nesta fase foram elaborados planos de projeto 2D em AutoCad e maquetes digitais nos programas Sketchup Pro 8 e Vray 2.0, explicitando os detalhes construtivos do protótipo.

### **3.3.2. Caracterização do sistema construtivo**

Quanto à caracterização do sistema construtivo, foram detalhados os elementos construtivos que compõem o sistema completo, sendo eles fundação, estrutura, vedação vertical, cobertura e as características de fabricação e montagem dos elementos. Também foram analisados os aspectos construtivos bem como a quantificação dos materiais.

### **3.3.3. Registro e análise do processo construtivo**

A fase final da terceira etapa foi a execução e construção de partes selecionadas do protótipo em escala natural. Nesse momento foi feito um registro do processo construtivo e uma análise dos procedimentos executados baseados, principalmente num registro fotográfico e relatório do processo. A construção desses elementos possibilitou a verificação da viabilidade construtiva de estruturas utilizando a ligação proposta, bem como a realização de possíveis ajustes de projeto e produção da ligação.

## **3.4. ANÁLISE PÓS PRODUÇÃO DA LIGAÇÃO E DO PROTÓTIPO – CONSIDERAÇÕES FINAIS.**

Finalmente foram analisados os resultados alcançados no desenvolvimento da ligação e na execução do protótipo, gerando conclusões e sugestões para a melhoria dos elementos de ligação desenvolvidos e dos processos construtivos. Igualmente foram apresentadas recomendações para futuros trabalhos.

## **4. DESENVOLVIMENTO DA LIGAÇÃO**

Na primeira parte deste capítulo são definidos os parâmetros de design para a nova ligação. Depois são desenvolvidos formalmente os elementos que compõem a ligação e é feita a análise de configurações formais e arquitetônicas que fornece a ligação proposta. Finalmente foram feitos ensaios no laboratório para verificar a resistência da ligação e uma análise econômica de produção da mesma.

### **4.1. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS**

Como já visto, existem diferentes tipos de ligações para construção com bambu, portanto na metodologia da pesquisa foi importante definir os aspectos nos quais a ligação proposta focaria. Os parâmetros de design foram definidos levando em consideração a necessidade de alternativas acessíveis de construção, tanto na área rural quanto nas cidades.

A seguir apresentam-se os principais parâmetros de design da ligação. Na tabela de especificações de design do produto são definidos os parâmetros críticos, especificações e requisitos do produto que vai ser projetado. Para cada um dos parâmetros são estabelecidas as expectativas e demandas que o elemento a desenvolver deve garantir. E para cumprir com essas demandas se formulam as exigências da peça (Tabela 2).

**Tabela 2.** Especificações de design do produto para a ligação

<b>Parâmetro</b>	<b>Expectativa</b>	<b>Demanda</b>	<b>Exigências</b>
Desempenho	Que seja versátil	Que permita a configuração de estruturas com diferentes geometrias	Os elementos da ligação devem permitir a montagem em diversos ângulos
		Que possa ser utilizada em elementos não estruturais	Os elementos de ligação devem se adaptar aos elementos não estruturais
	Que possibilite agilidade na construção	Que permita a pré-fabricação de elementos	As peças da ligação devem ser pré-fabricadas
			A montagem das peças no elemento de bambu deve exigir só habilidades básicas
			A montagem das peças no elemento de bambu deve ser rápido
		Que a montagem na obra seja ágil	A montagem dos elementos estruturais na obra deve exigir só habilidades básicas
			A montagem não deve exigir soldagem ou processos similares que exijam pessoal qualificado
			A ligação deve ser leve
			Os elementos de bambu com ligações devem poder ser manipulados por no máximo dois operários
	Que seja um elemento de longa duração	Que sua duração seja similar à de qualquer outro elemento utilizado na estrutura	Os elementos devem durar tanto ou mais do que os elementos de bambu
			Os elementos devem suportar as cargas durante a vida útil da estrutura

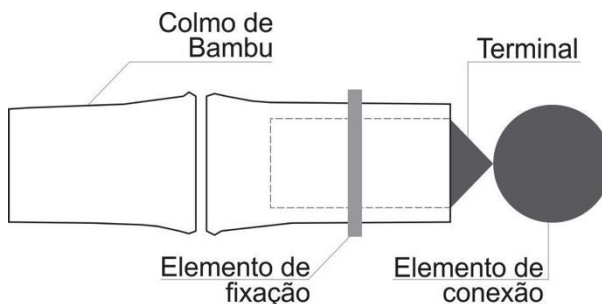
Seguridade	Que garanta estabilidade da estrutura	Que seja resistente às cargas	A ligação deve atender as cargas às quais vai ser submetida
			A ligação deve atender as tensões admissíveis definidas nas normas para elementos estruturais com bambu Guadua
		Que permita resistência aos sismos	A ligação deve permitir a ductilidade da estrutura
			A ligação não deve restringir a elasticidade do bambu
	Que seja segura em caso de incêndio	Que resista o fogo	A ligação deve ser feita de um material resistente ao fogo
			A ligação deve se poder proteger do fogo
Manutenção	Que precise pouca manutenção	Que a ligação não precise de uma maior manutenção do que a estrutura em conjunto	As peças devem poder ser recobertas de produtos anticorrosivos ou similares
			Os elementos devem durar tanto ou mais do que os elementos de bambu
		Que permita a troca de peças da ligação	As peças devem-se poder substituir após finalizada a construção
	Que a manutenção seja de maneira ágil	Que a manutenção não seja mais complexa do que a manutenção da estrutura em conjunto	A manutenção da ligação deve exigir só habilidades básicas
			A ligação deve permitir a manutenção dos elementos de bambu

Custo	Que seja competitivo em relação a outras ligações	Que seu custo em relação aos seus benefícios não seja maior do que as outras ligações comerciais	As peças da ligação devem se poder fabricar de maneira industrial
			As peças da ligação devem ser feitas de um material amplamente disponível e econômico
			Devem-se evitar os processos e maquinarias muito complexas na fabricação de peças
			A ligação deve integrar peças comerciais já existentes
			O tamanho e peça da ligação deve favorecer seu transporte e comercialização
Composição Estética	Que reduza custos extras de manutenção	Que os custos de manutenção da estrutura sejam reduzidos	A ligação deve ajudar na redução de patologias da estrutura
			As peças da ligação devem ser de longa duração
			A ligação deve permitir a substituição de peças durante a vida útil da estrutura
	Que a ligação seja esteticamente adequada	Que a ligação tenha boa imagem estética e dê à estrutura uma imagem estética	As peças de ligação devem ter uma proporção adequada em relação ao elemento de bambu
			A ligação deve permitir a instalação de materiais de recobrimento ou vedações
			A ligação deve permitir a personalização das peças

## 4.2. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS QUE COMPÕEM A LIGAÇÃO

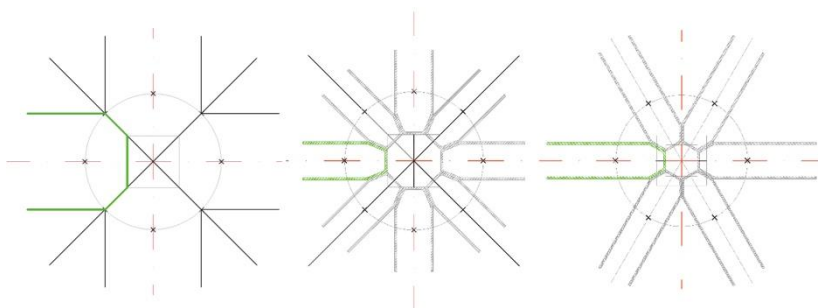
Na procura de uma ligação ou elementos de ligação que atendessem os parâmetros de design estabelecidos no início do processo, foi feito um *brainstorming* para determinar sua forma e seu funcionamento.

Para efeitos práticos de entendimento do trabalho se faz a seguinte denominação as partes e peças que compõem a ligação. O conjunto da ligação é conformado pelo colmo de bambu, o terminal da ligação, os elementos de fixação (que fazem a amarração entre o terminal e o colmo) e os elementos de conexão (fazem a ligação do terminal com outros elementos da edificação). Na figura 22, a seguir se detalham esses elementos.



**Figura 22.** Partes da ligação.

O processo de design formal do terminal da ligação iniciou com uma abstração de um cruzamento a 90° em um plano 2D. Depois foi abstraído um dos elementos do cruzamento para ser desenvolvido de maneira independente, (Figura 23). Esse elemento tinha duas superfícies a 90° entre elas e a 45° em relação ao eixo de cruzamento. Pensando na versatilidade formal, que é um dos parâmetros de design principais, foi modificado o ângulo entre as superfícies, primeiro para 45° e depois para 60°, na procura de mais possibilidades formais de configuração.



**Figura 23.** Imagens ilustrativas do processo de design do terminal

Assim o terminal da ligação foi projetado com superfícies de contato em diferentes ângulos. Em cada uma das superfícies foram projetadas duas perfurações nas quais estariam os pontos de conexão com outros elementos de ligação ou com elementos de bambu através de parafusos ou barras rosqueadas. Após verificar as dimensões da peça e as normas para elementos metálicos foi projetada com apenas uma perfuração por superfície para garantir a firmeza da peça metálica. Nas superfícies mais cumpridas do terminal foram feitas perfurações para fazer a fixação no colmo de bambu. As quatro perfurações feitas em cada superfície permitem alternar os elementos de fixação quando dispostos dois terminais em cruz no extremo do colmo (Figura 24).





**Figura 24.** Opções de terminal (1) Terminal com dois pontos de conexão. (2) Terminal com um ponto de conexão.

Para definir as dimensões das peças que compõem a ligação foi levada em consideração a norma NSR-10 (2010) a qual estabelece as dimensões mínimas para os parafusos, arruelas e espessuras de platinas utilizadas nas ligações. O título G da norma também especifica as distâncias mínimas dos parafusos ao extremo do colmo. A seguir, na tabela 3 apresenta-se um resumo das diretrizes para ligações no bambu Guadua da Norma NSR-10:

**Tabela 3.** Resumo das diretrizes para ligações no bambu Guadua da Norma NSR-10

Elementos	Diretrizes
Pernos e barras rosqueadas	Aço estrutural (limite de escoamento não menor do que 240 MPa)
	Diâmetro mínimo: 9,5mm – 3/8" (#3)
	Perfuração no bambu: Diâmetro do parafuso mais 1,5mm
Arruelas	P/ parafusos de 9,5mm (3/8") deve ter 45mm de diâmetro e 4mm de espessura
	P/ parafusos de 12,5mm (1/2") deve ter 50mm de diâmetro e 5mm de espessura

Peças metálicas	Espessura mínima: 4,8 mm (3/16")
	Levar em conta o título F de estruturas metálicas da norma NSR 10, o qual estabelece especificações de materiais e dimensões das peças metálicas estruturais.
Outras observações	A distância entre o extremo do colmo e o parafuso deve ser de 100mm em elementos submetidos à compressão e de 150mm em elementos submetidos a esforços de tração.
	A argamassa de cimento para o preenchimento de entrenós deve ter uma relação de 1:3 e usar preferencialmente aditivo plastificante.
	O diâmetro máximo da perfuração para o preenchimento do concreto nos entrenós é 26mm.

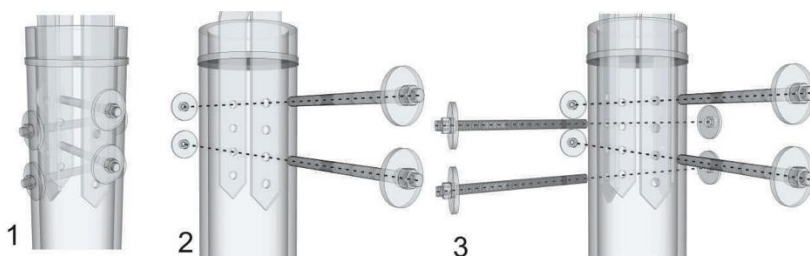
Igualmente, para definir as dimensões dos elementos da ligação, foi levada em consideração a pesquisa de caracterização da anatomia da GAK realizada por Londoño (2002), na qual foi definida a média do diâmetro, espessura e a distância entre os nós em diferentes segmentos do colmo da *Guadua* em idade adulta. Na tabela 4 é apresentado o resumo das dimensões definidas na pesquisa de referência.

**Tabela 4.** Dimensões anatômicas da *Guadua Angustifolia*

Segmento do colmo	Diâmetro (cm)	Espessura das paredes (cm)	Distância entre nós (cm)
Base	11,15	1,82	20,25
Metade	11,05	1,32	34,83
Topo	5,84	0,89	33,38

Mesmo consciente que o bambu é um material natural e que varia em suas dimensões de um elemento para outro, as dimensões apresentadas foram levadas em conta para o projeto da ligação.

Um dos principais objetivos de design foi garantir o uso estrutural da ligação mas que poupara, na maioria dos elementos da estrutura, o uso do concreto nos entrenós. Isto no intuito de ter estruturas mais leves, evitar as patologias produzidas pela ação do concreto (especialmente as fissuras) e permitir a substituição de peças na manutenção. O bambu tem boa resistência aos esforços de tração e compressão paralela à fibra, no entanto as resistências dos colmos aos esforços perpendiculares à fibra são muito baixos, isto devido, diferentemente da madeira, o bambu carece de fibras radiais. Nas configurações em T ou nas quais um elemento vertical de bambu suporta outros elementos no seu extremo, usando comumente o corte boca de peixe, as fissuras são recorrentes. Segundo Takeuchi (2003), o peso suportado no extremo do colmo e a deformação dos elementos apoiados produzem, pela baixa resistência às cargas perpendiculares à fibra, uma tensão perpendicular à fibra no elemento de apoio gerando figuras e rachaduras. Assim, a ligação proposta devia suportar as cargas pontuais e transmiti-las ao colmo de maneira mais distribuída e eficiente. Para tanto, foi abordada a maneira da montagem ao elemento de bambu em sua forma natural roliça, com o objetivo de atender o parâmetro de desempenho na redução de patologias, principalmente as fissuras pelo apoio pontual das cargas no bambu. Igualmente a maneira de instalação das peças da ligação ao bambu devia atender a pré-montagem de elementos da estrutura e a substituição de peças na etapa de manutenção do edifício. Logo a ligação devia ter vários pontos de fixação ao elemento de bambu para distribuir as cargas mas ao mesmo tempo permitir a remoção das peças. Neste caso a ligação foi projetada para usar na espécie *Guadua Angustifolia* Kunt, levando em consideração suas dimensões comerciais, no entanto os elementos de ligação podem ser adaptados para outras espécies de bambu mesmo com dimensões diferentes, (Figura 25).



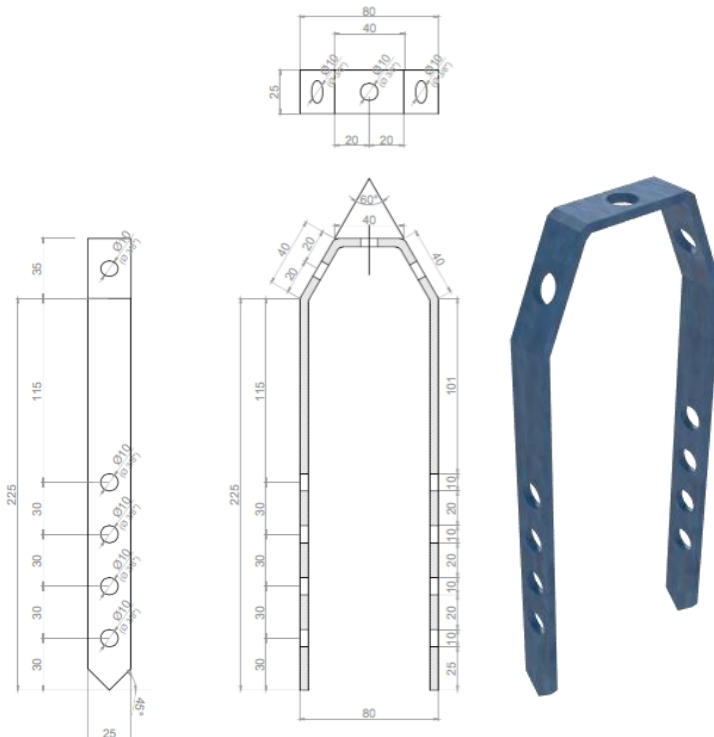
**Figura 25.** Imagens ilustrativas montagem da ligação (1) Montagem terminal-colmo. (2) Montagem de um terminal (3) Montagem de dois terminais.

Garantir o baixo custo da ligação foi um parâmetro atendido primeiramente através da seleção do aço estrutural como material do corpo principal da peça. O aço estrutural é um material recomendado pelas normas de construção no mundo para as peças de ligação. É um material comum com uma ampla disponibilidade e preços acessíveis no setor da construção. Além da seleção do material, foi projetado ter só uma peça como corpo principal da ligação, complementada com outros elementos comerciais como barras rosqueadas, parafusos, arruelas e porcas, reduzindo custos. Essa peça principal da ligação precisava ser de forma simples facilitando sua produção, evitando a maquinaria especializada na sua fabricação. Finalmente as peças complementares para configuração de estruturas especiais deviam ser projetadas como elementos adicionais fora do corpo principal da ligação, podendo ser adquiridas individualmente conforme a necessidade da estrutura.

Desenvolvido o conceito formal e funcional da ligação foram feitas análises de configurações espaciais e formais, com o intuito de verificar sua versatilidade na configuração de estruturas. Foi feito, também, o design dos elementos complementares para concepção de estruturas especiais como estruturas abobadadas, treliças, malhas espaciais, etc. No capítulo seguinte serão detalhadas essas análises.

Depois de levar em consideração as análises formais, os elementos compositivos e os parâmetros necessários para o

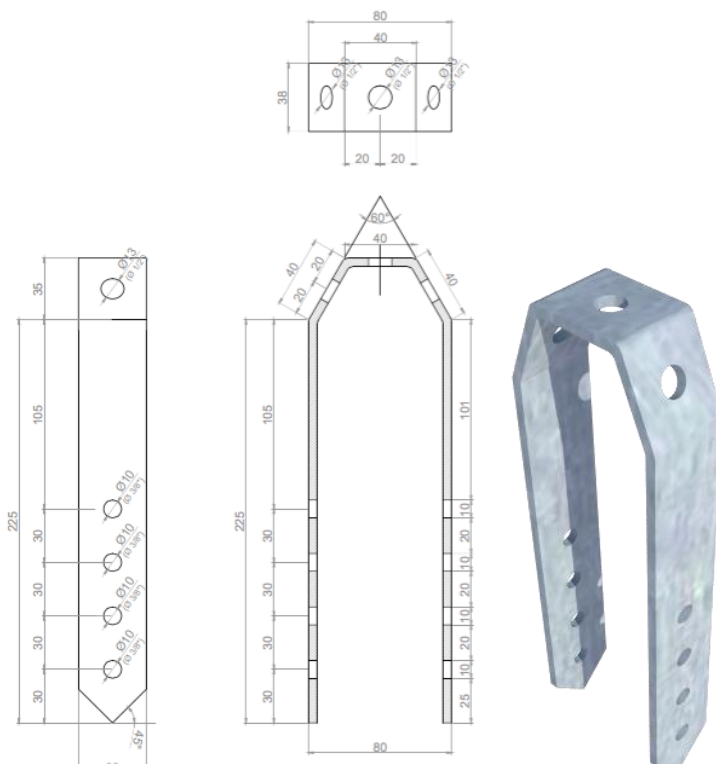
design do elemento de ligação, foi decidido produzir duas tipologias diferentes, com o intuito de conhecer, nos ensaios de laboratório, suas resistências e ter uma proposta econômica mas confiável para uso estrutural. A primeira tipologia, ou tipologia L25mm-P9,5mm(3/8") (Figura 26), é composta de um elemento metálico de 4,8mm (3/16") de espessura e 25mm de largura, com perfurações de 10mm para o uso de parafusos e barras rosqueadas de 3/8". O terminal conta com quatro perfurações em cada uma das partes mais compridas, para a fixação com o bambu, e uma perfuração nas porções inclinadas e na superior como pontos de contato.



**Figura 26.** Dimensões e isométrico da tipologia L25mm-P9,5mm(3/8").  
(Dimensões em mm)

A largura do corpo principal da ligação foi determinada pelos furos realizados no elemento. Segundo o título F da norma NSR-10 (2010), quanto a parafusos menores do que 12,5mm (1/2"), a distância mínima entre o centro do furo-padrão à borda do elemento deve ser 2,5 vezes o raio do parafuso ou barra rosqueada. Igualmente, tanto a norma NBR 8800 quanto a NSR-10 determinam que o espaçamento mínimo entre furos deve ser 3 vezes o diâmetro do furo-padrão, medido entre os centros dos furos.

Segundo a NBR 8800 (2008), para parafusos ou barras rosqueadas de 1/2 polegada, a distância mínima do centro de um furo-padrão à borda do elemento deve ser 19mm. A norma colombiana NSR-10 define essa distância em 19,1mm. Baseado nisso, foi projetada a segunda tipologia de terminal, tipologia L38mm-P12,5mm(1/2"), com o intuito de ter pontos de fixação com parafusos de 1/2 polegada. Na figura 27, está representada a tipologia 2, que se compõe de um elemento metálico de 4,8mm (3/16") de espessura, mas com 38mm de largura. As duas tipologias contam com o mesmo número e localização das perfurações. As quatro perfurações nas partes mais compridas da peça são de 10mm, da mesma forma que na anterior, enquanto as perfurações nas superfícies inclinadas e na superior são de 12,5mm (1/2").



**Figura 27.** Dimensões e isométrico da tipologia L38mm-P12,5mm(1/2").  
(Dimensões em mm)

O processo de fixação do terminal no colmo é detalhado a seguir: Primeiro foi feito um corte reto no extremo do colmo deixando de 3 a 6 cm entre o nó e o bordo do colmo. O interior do nó foi perfurado com broca, perto das paredes internas. Depois foram feitos, no colmo, os furos de fixação do terminal, com ajuda de sinais de referência feitos no exterior do bambu e broca comprida para perfurar a circunferência completa numa ação da broca. Os furos foram feitos segundo o tipo de ligação e o tipo de fixação: linear com uma terminal e duas a quatro barras rosqueadas ou em cruz com duas terminais e quatro barras rosqueadas cruzadas.

Para fixar o terminal no colmo de Guadua foram utilizadas barras redondas rosqueadas de 9,5mm (3/8”) de 15cm de comprimento, arruelas e porcas metálicas. Todos os elementos deviam ser de aço galvanizado de alta resistência para uso estrutural. As referências ASTM de materiais dos elementos comerciais podem ser consultadas na NBR 8800 numeral 6.3 e no Título F da NSR-10.

A montagem da ligação foi feita introduzindo a peça metálica a través dos furos feitos no nó e fixando-a no colmo com as barras rosqueadas, arruelas e porcas. As superfícies de contato ficaram expostas para fazer ligação a través de parafusos, (Figura 28).



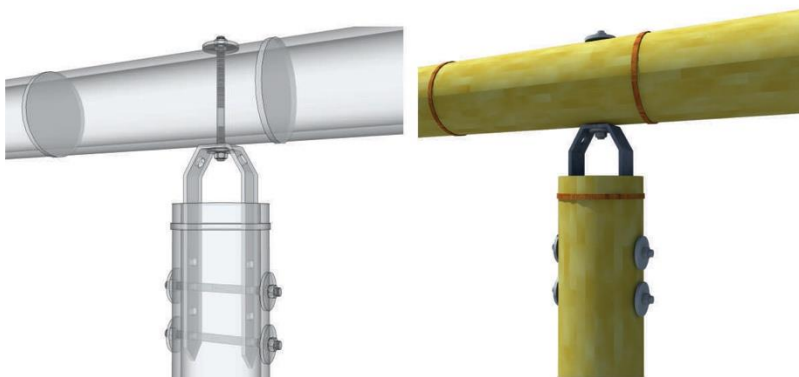
**Figura 28.** Processo de montagem e fixação do terminal no colmo de bambu Guadua.

#### 4.3. POSSIBILIDADES DE ENCAIXES QUE PERMITE FLEXIBILIDADE FORMAL E ARQUITETÔNICA DA LIGAÇÃO

Neste capítulo são apresentadas diferentes configurações formais que poderiam ser desenvolvidas utilizando a ligação proposta. Inicialmente apresentam-se configurações tradicionais para elementos bidimensionais, depois estruturas tridimensionais e superfícies curvadas.

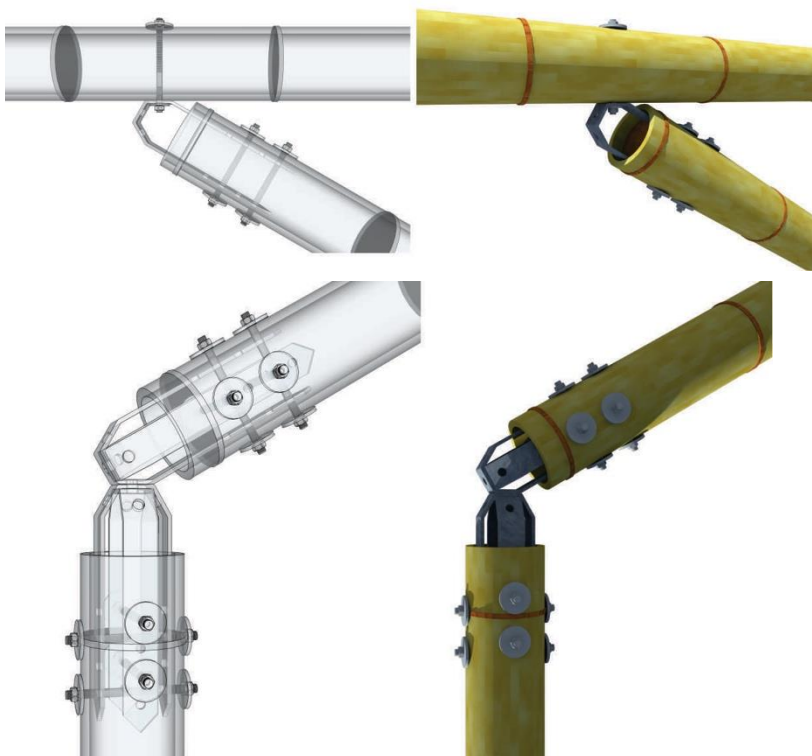


A configuração básica de coluna e viga em T pode ser feita com a ligação, tendo a vantagem de fazer pré-montagem de ligações nos elementos e evitar fissuras nos colmos de apoio pela distribuição das cargas através de vários pontos de fixação poupando o apoio de elementos nos extremos dos colmos, (Figura 29). No entanto, o colmo vertical pode ter, também, o corte boca de peixe para melhorar o encaixamento dos elementos.



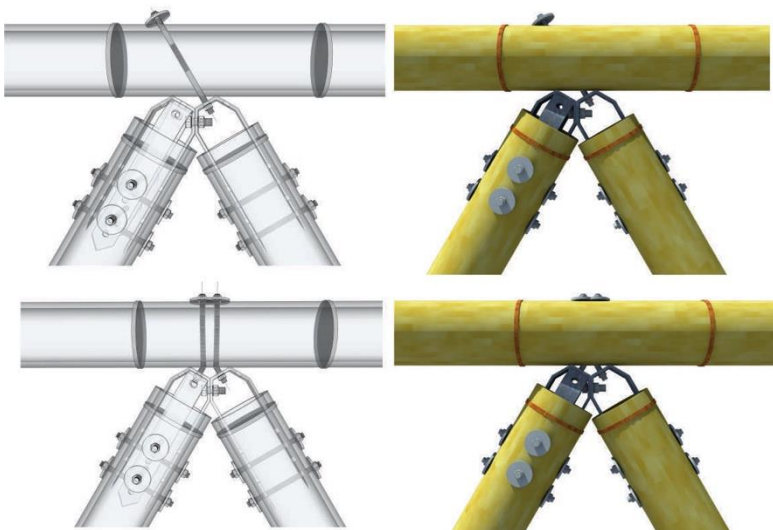
**Figura 29.** Configuração coluna-viga em T

Outras configurações de dois elementos podem ser realizadas por meio do apoio do colmo na superfície inclinada do terminal, que faz a conexão com barras rosqueadas, (Figura 29). Igualmente, a união entre elementos pode ser feita por meio da conexão direta entre as terminais fixadas com parafusos, (Figura 30). Esse tipo de ligação potencializa a condição de pré-montagem que fornece o sistema desenvolvido, poupando tempos e processos na obra.



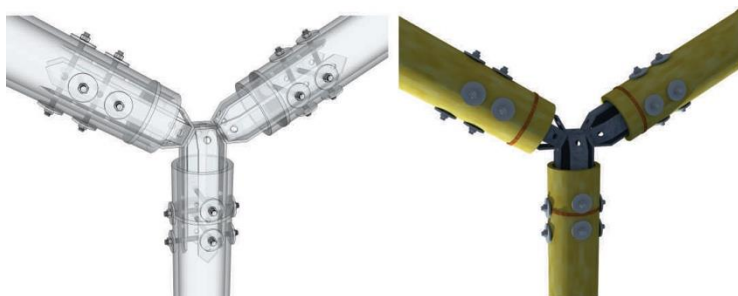
**Figura 30.** (acima) Ligação terminal-colmo. (abaixo) Ligação terminal-terminal.

Os sistemas de ligação com conexão entre terminais podem ser misturados com conexões diretas a elementos de bambu, como ilustrado na figura 31.

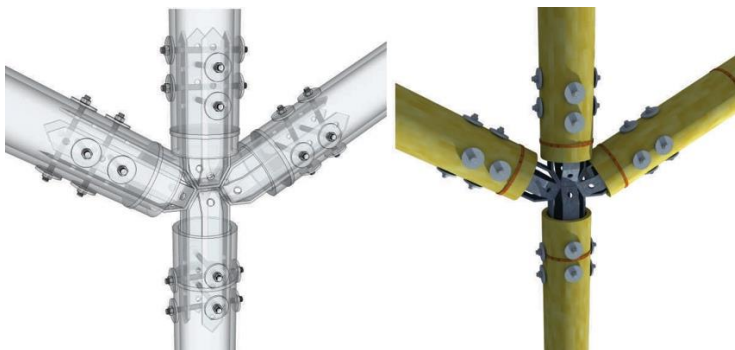


**Figura 31.** Ligação duas terminais-colmo.

Além disso, as conexões entre terminais podem ser de três e quatro elementos, (Figuras 32 e 33). Até mesmo, podem conter mais de quatro elementos quando saem do plano 2D para o 3D.



**Figura 32.** Ligação de três terminais.



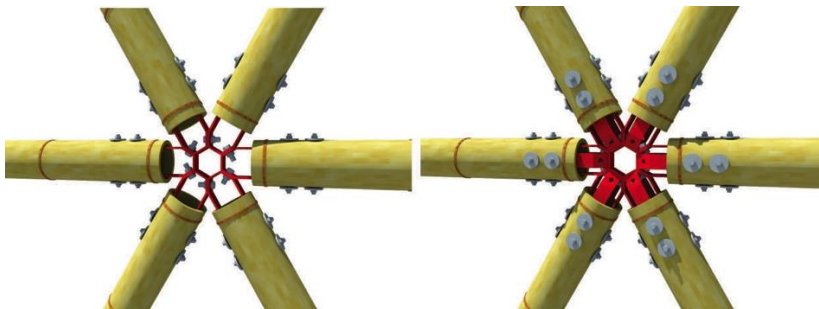
**Figura 33.** Ligação de quatro terminais.

Os elementos de ligação podem também fazer a conexão com o sistema de fundação da edificação, (Figura 34). Nessa função os terminais da ligação são submetidos principalmente a esforços de compressão. A transmissão das cargas através dos elementos metálicos, evitando o apoio direto do bambu nas bases, representa a redução de rachaduras que se apresentam nos extremos apoiados dos colmos.



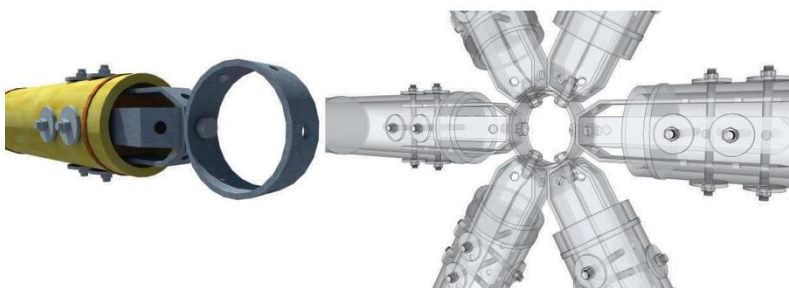
**Figura 34.** Conexão terminal-base em diferentes ângulos.

Na configuração de grandes superfícies planas tipo fachadas, lajes e coberturas, é possível agrupar seis elementos com sistema de ligação dispostas radialmente com um ponto central em comum, (Figura 35).



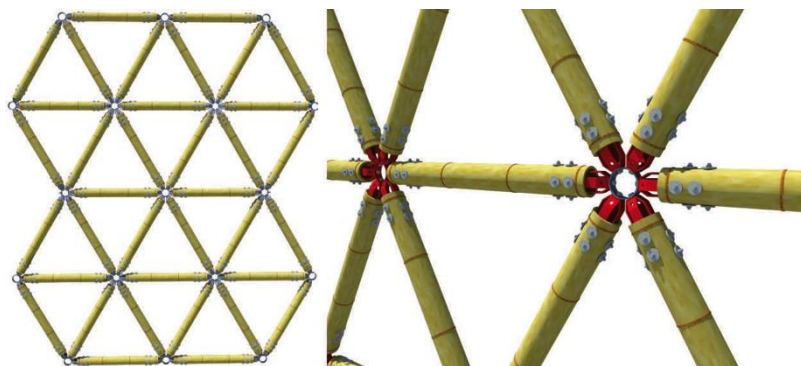
**Figura 35.** Configuração de superfícies por ligação de seis terminais em disposição radial.

Também, podem-se utilizar elementos adicionais para obter diferentes estéticas ou diversos tipos de conexão com outros elementos da edificação, por exemplo vidros e painéis. Além disso, esses elementos adicionais fornecem a possibilidade de conexão em múltiplos ângulos. Mantendo a ideia de desenvolver elementos construtivos que estejam ao alcance de qualquer pessoa, neste caso é proposto um elemento de conexão, que é uma seção de tubo metálico furado em diferentes ângulos. A largura do aro metálico deve ser 38mm e o diâmetro dos furos de 12,5mm (1/2"), (Figura 36).



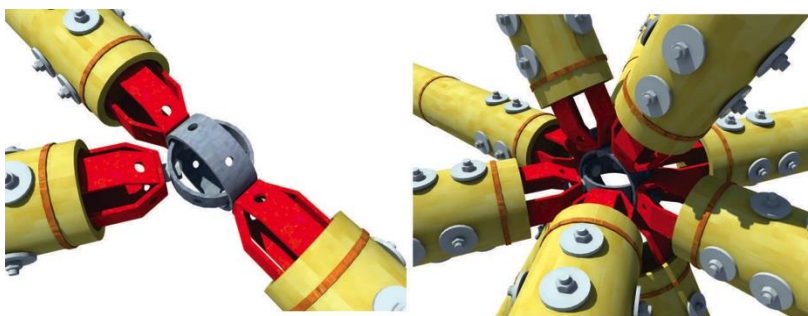
**Figura 36.** Conector tipo aro perfurado.

O uso deste elemento provê uma estética interessante e econômica em grandes superfícies – em fachadas por exemplo - e a quantidade e disposição dos furos no elemento fornecem variadas configurações de superfícies, (Figura 37).



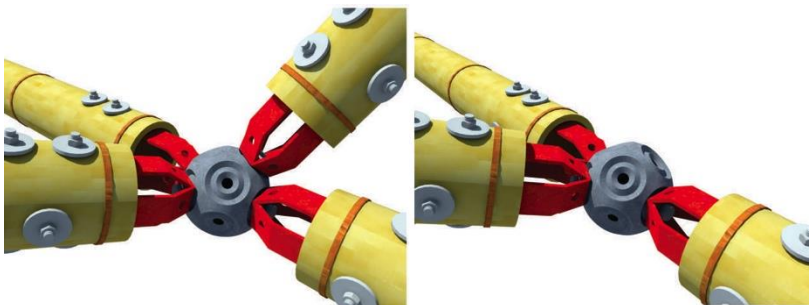
**Figura 37.** Configuração de fachadas com conector tipo aro.

Com elementos similares é possível configurar estruturas tridimensionais. A combinação de seções tubulares de diferentes diâmetros dispostos em cruz um dentro de outro, fornece um conector para construção de estruturas tridimensionais de fácil fabricação, (figura 38).



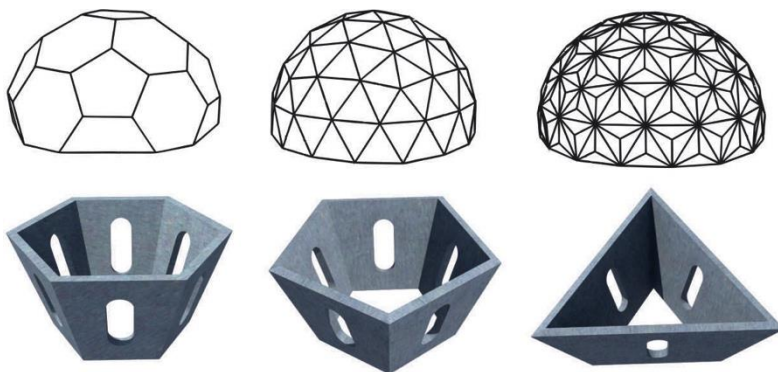
**Figura 38.** Conector tipo aro em 3D.

É possível utilizar o sistema de ligação com a esfera Mero para a configuração de estruturas tridimensionais como malhas espaciais, (Figura 39).



**Figura 39.** Configuração de estruturas utilizando a esfera Mero.

Na configuração de superfícies curvas, tipo abobadas, cúpulas e coberturas de dupla curvatura, é preciso o uso de peças de conexão especiais para o tipo de estrutura a desenvolver. Neste caso são propostos três tipos de elementos de conexão para a configuração de domos, os dos primeiros – de forma hexagonal e pentagonal – indispensáveis para conformação deste tipo de estruturas, (Figura 40).



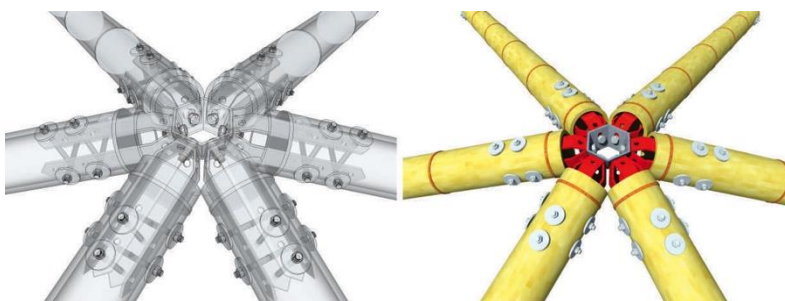
**Figura 40.** Conectores para configuração de estruturas tipo domo.

Os elementos de conexão são feitos de peças metálicas soldadas com furos alongados em cada superfície. Deve ser usada, na sua fabricação, lâmina de aço com bitola de 4,8mm. As perfurações são feitas segundo a NBR 8800, que define as dimensões dos furos muito alongados assim: ( $d_b + 1,5\text{mm}$ ) x

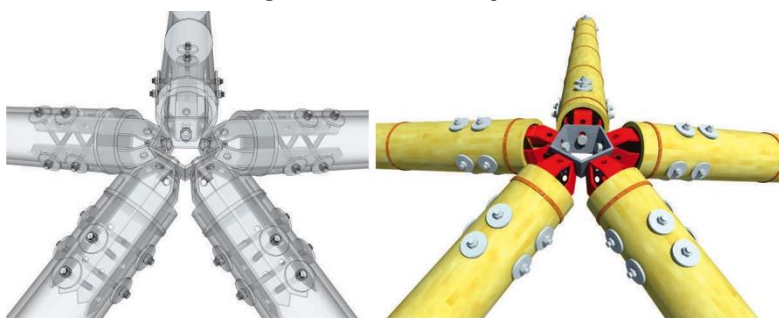


$2,5d_b$ , sendo  $d_b$  o diâmetro do parafuso. Do mesmo modo, a NSR-10 define que as dimensões do furo muito alongado devem ser 14,3mm x 31,8mm p/ parafusos de 12,5mm (1/2").

Nas figuras 41, 42 e 43, apresentam-se as configurações do sistema de ligação com os elementos de conexão hexagonal, pentagonal e triangular, que possibilitam a construção de diferentes tipos de domos.

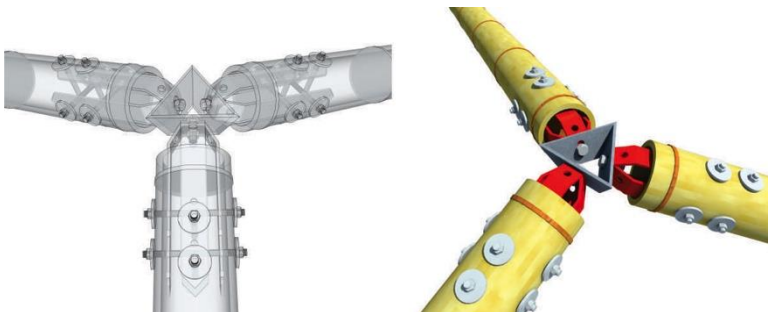


**Figura 41.** Conexão hexagonal.



**Figura 42.** Conexão pentagonal.





**Figura 43.** Conexão triangular.

Essas são algumas das possibilidades de encaixes que fornece o sistema de ligação na configuração de estruturas. No entanto, sempre é possível propor novas alternativas formais de conforme às necessidades da edificação.

#### 4.4. PRODUÇÃO DO TERMINAL DA LIGAÇÃO

No processo de produção do terminal foi feita uma primeira encomenda para a siderúrgica Logistool. Nesta primeira encomenda foram fabricados terminais da tipologia L25mm-P9,5mm(3/8"). Os elementos produzidos tinham variações nas dimensões de um para outro e alterações no ângulo das superfícies inclinadas da peça. Além disso o acabamento do material não ficou uniforme gerando uma estética não desejada, (Figura 44). O custo da peça foi de 7.500\$ COP, o equivalente a 8,8\$ BRL ou 2,6\$ USD.



**Figura 44.** (1) e (2) Maquinaria da siderúrgica Logistool. (3) Terminais produzidas na siderúrgica Logistool.

Depois foi feita uma nova encomenda com o intuito de obter uma peça com dimensões padronizadas e diminuir as variações na forma. Foram produzidas, pela empresa Ingenox, terminais das duas tipologias projetadas. Os resultados na produção das peças foi satisfatória com dimensões padronizadas, garantindo os ângulos requeridos. A produção da peça consiste num processo simples que inicia com o corte da folha metálica da bitola especificada obtendo peças de largura e comprimento total do terminal. Após, são feitas as perfurações por golpe de pressão com furador e finaliza fazendo a dobra frio nos ângulos solicitados, (Figura 45).



**Figura 45.** (1) e (2) Maquinaria da siderúrgica Ingenox. (3) Terminais produzidas na siderúrgica Ingenox.

Pelo comprimento da peça, na hora de fazer a dobra da lâmina, a máquina que a faz não garantia os 8 cm de largura do terminal levando até 8,50 cm. Foi verificado então no 2D, modificando a largura da peça, a compatibilidade do terminal com os colmos do Guadua de dimensões comerciais. A mudança na largura não representou incompatibilidade na montagem da ligação. Isso foi confirmado nas montagens feitas posteriormente.

#### 4.5. ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DA LIGAÇÃO

Em matéria de comportamento estrutural, o foco do projeto da ligação foi aproveitar o desempenho do bambu em relação às forças axiais, mesmo que com vários pontos de conexão (três

por terminal na configuração linear) receba cargas em vários sentidos. Como já visto, é nesse tipo de esforços que o bambu tem melhor comportamento estrutural. Assim, para conhecer o desempenho estrutural da ligação foram feitos ensaios de laboratório submetendo os elementos em conjunto a esforços de compressão e tração.

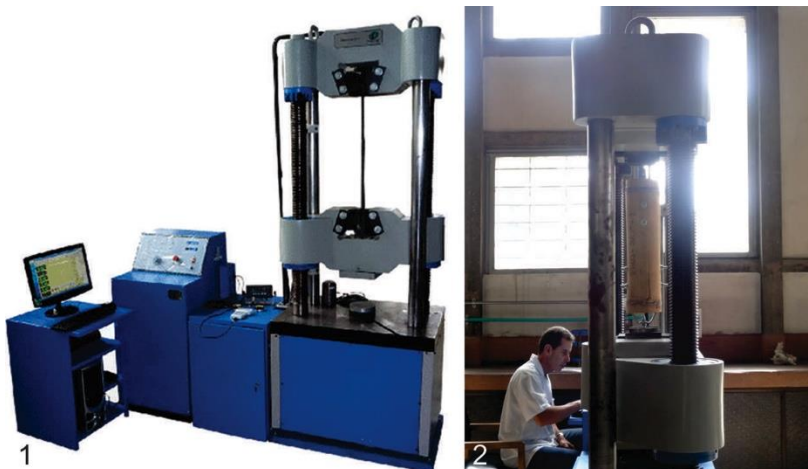
Para os ensaios foram utilizados colmos de bambu *Guadua Angustifolia* Kunth com as seguintes características:

- Corte em idade madura ao redor de 4 anos;
- Tratamento de preservação por imersão com produtos à base de Boro;
- Secagem em forno automatizado, garantindo conteúdo de umidade de 12% (+-3%);
- Acabamento exterior polido.

Igualmente foram utilizadas peças terminais produzidas pela siderúrgica Ingenox com 8,50 cm de largura.

Foram feitos 8 corpos de prova, sendo 4 deles submetidos à esforços de tração e os 4 restantes à compressão, utilizando para cada tipo de esforço as duas tipologias de terminal propostas, em duas configurações: linear e em cruz.

Os ensaios, tanto de tração quanto de compressão foram realizados no laboratório de Estruturas da Universidade Nacional da Colômbia em Medellín. Foi utilizada uma prensa PINZUAR de 1000 kN de capacidade. A prensa tem funcionamento automatizado que garante a aplicação estável da carga e o registro confiável de dados, (Figura 46).

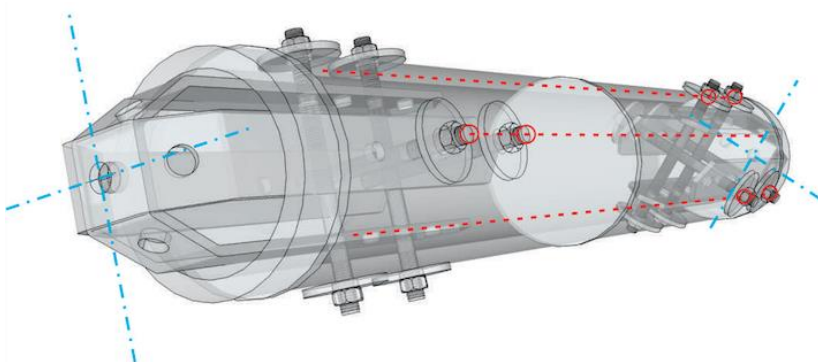


**Figura 46.** (1) Prensa Universal PINZUAR para ensaios de materiais. Disponível em: <http://www.pinzuar.com.co/> (2) Laboratório de Estruturas Universidade Nacional da Colômbia em Medellín.

#### **4.5.1. Ensaios de esforço axial à tração**

Os ensaios de esforço axial à tração foram feitos em 4 corpos de prova. Os corpos de prova tinham dois sistemas de ligação, um por cada extremo do colmo, para a transmissão das cargas. Nos terminais foram usadas barras rosqueadas para sua amarração nas mordças da prensa. No caso dos corpos de prova dos ensaios 1 e 2, foram usadas barras rosqueadas de 9,5mm (3/8") com comprimento de 150mm, fixadas com porcas e arruelas à peça terminal. Para os ensaios 3 e 4 foram utilizadas barras rosqueadas de 12,5mm (1/2") com comprimento de 150mm.

As peças terminais foram fixadas ao colmo garantindo uma defasagem entre elas no sentido radial, com o intuito de não sobrecarregar os esforços na mesma área de fibras no sentido longitudinal do colmo. O anterior se ilustra na figura 47.



**Figura 47.** Disposição das barras rosqueadas de fixação terminal-colmo para os corpos de prova submetidos à tração (eixo vermelho).

A seguir são detalhados os corpos de prova elaborados, o procedimento dos ensaios e os resultados obtidos para cada um.

### **Ensaio 1.** Corpo de prova TRA – 3/8” – L

O corpo de prova foi conformado por uma secção de colmo, com 464 mm de comprimento, uma média no diâmetro de 123 mm e 10 mm de espessura nas paredes, além de duas peças terminais, uma em cada extremo do colmo, do tipo L25mm-P9,5mm(3/8’'). O comprimento total do corpo de prova foi de 840 mm, incluindo as barras rosqueadas nos extremos e o peso foi de 2,71 kg, (Figura 48).



**Figura 48.** Procedimento do ensaio de tração no corpo de prova TRA – 3/8” – L.

A ruptura do corpo de prova sob tração aconteceu na carga de **13,52 kN**, por falha no colmo de Guadua. O corpo de prova apresentou deformações nas peças terminais e nas barras rosqueadas de fixação colmo-terminal, além de rachaduras no bambu no sentido longitudinal desde os dois extremos gerando a ruptura por cisalhamento paralela às fibras (Figura 49).



**Figura 49.** Estado do corpo de prova TRA – 3/8” – L após o ensaio.

## **Ensaio 2. Corpo de prova TRA – 3/8” – X**

O corpo de prova estava conformado por um colmo de bambu de 448 mm de comprimento, 124 mm de diâmetro e 10 mm de espessura das paredes. Foram colocadas 4 peças terminais do tipo 1, L25mm-P9,5mm(3/8”), dois em cada extremo

do colmo dispostas em cruz. O comprimento total do sistema foi de 820 mm e seu peso foi de 3,85 kg, (Figura, 50).



**Figura 50.** Procedimento do ensaio de tração no corpo de prova TRA – 3/8” – X.

A ruptura do corpo de prova sob tração aconteceu na carga de **14,67 kN**, por falha das barras rosqueadas nos extremos do sistema utilizadas para sujeição com as mordças da prensa. Apresentaram-se ligeiras deformações nas peças terminais, quase imperceptíveis visualmente, na superfície de contato com as barras de acoplamento à prensa. O colmo de Guadua não apresentou nenhuma deformação ou rachadura (Figura 51).



**Figura 51.** Estado do corpo de prova TRA – 3/8” – X após o ensaio.



### Ensaio 3. Corpo de prova TRA – 1/2" – L

O corpo de prova foi conformado por uma secção de colmo, de 430 mm de comprimento, 129 mm de diâmetro e 11 mm de espessura das paredes, além de duas peças terminais, uma em cada extremo do colmo, do tipo L38mm-P12,5mm(1/2"). O comprimento total do sistema foi de 750 mm, seu peso foi de 3,32 kg, (Figura 52).



**Figura 52.** Procedimento do ensaio de tração no corpo de prova TRA – 1/2" – L.

A ruptura do corpo de prova sob tração aconteceu na carga de **13,59 kN**, por falha no colmo de bambu Guadua. O corpo de prova apresentou ligeiras deformações nas peças terminais e nas barras rosqueadas de fixação colmo-terminal. O bambu apresentou rachaduras no sentido longitudinal do colmo desde os dois extremos, provocando a ruptura do corpo de prova (Figura 53).



**Figura 53.** Estado do corpo de prova TRA – 1/2" – L após o ensaio.



#### Ensaio 4. Corpo de prova TRA – 1/2" – X

O corpo de prova foi conformado por um colmo de bambu de 461 mm de comprimento, 124 mm de diâmetro e 11 mm de espessura das paredes. Foram colocadas 4 peças terminais do tipo L38mm-P12,5mm(1/2"), dois em cada extremo do colmo dispostas em cruz. O comprimento total do corpo de prova foi de 795 mm e seu peso de 5,32 kg (Figura 54).



**Figura 54.** Procedimento do ensaio de tração no corpo de prova TRA – 1/2" – X.

A ruptura do corpo de prova sob tração aconteceu na carga de **32,40 kN**, por falha das barras rosqueadas nos extremos da amostra, utilizadas para sujeição com as mordças da prensa. Não se evidenciaram deformações nas peças terminais, mas as barras rosqueadas de fixação terminal-colmo apresentaram uma ligeira excentricidade. O colmo de Guadua não apresentou nenhuma deformação ou rachadura (Figura 55).



**Figura 55.** Estado do corpo de prova TRA – 1/2" - X após o ensaio.

#### 4.5.2. Ensaios de esforço axial a compressão

Os ensaios de esforço axial a compressão foram feitos em 4 corpos de prova. Foi colocado unicamente um sistema de ligação no colmo, liberando o outro extremo para o apoio do corpo de prova na base da prensa. A carga foi exercida diretamente pela prensa na superfície do terminal paralela ao corte do colmo.

A seguir, detalham-se os corpos de prova elaborados, o procedimento dos ensaios e os resultados obtidos para cada caso.

##### Ensaio 5. Corpo de prova COM – 3/8” – L

O corpo de prova foi conformada por um colmo de bambu de 459 mm de comprimento, 115 mm de diâmetro e 12 mm de espessura das paredes. Foi colocada uma peça terminal do tipo L25mm-P9,5mm(3/8”) no topo do colmo e na base foi colocado um suporte de borracha para evitar o deslocamento do sistema. O comprimento total do corpo de prova foi de 504 mm e seu peso de 1,91 kg, (Figura 56).



**Figura 56.** Procedimento do ensaio de compressão no corpo de prova COM – 3/8” – L.

A ruptura do corpo de prova COM – 3/8” – L sob compressão aconteceu na carga de **12,25 kN**, por falha do colmo de bambu Guadua. A pressão na superfície do terminal deformou

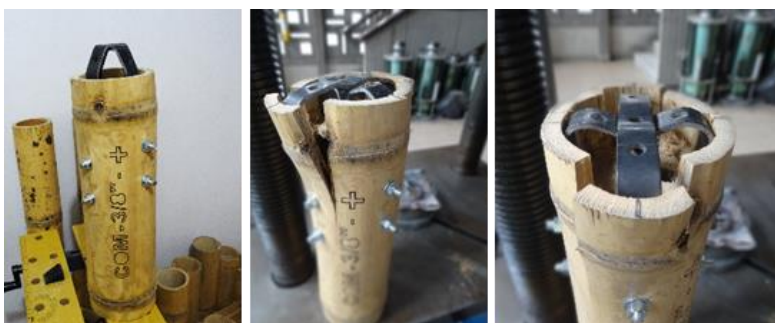
o elemento metálico por achatamento, fazendo com que as partes inclinadas do terminal fizeram pressão nas paredes do bambu, gerando fortes rachaduras e a falha no colmo por tração perpendicular às fibras. O bambu na sua base não sofreu alterações físicas visíveis pelos esforços de compressão (Figura 57).



**Figura 57.** Estado do corpo de prova COM – 3/8” – L após o ensaio.

### **Ensaio 6. Corpo de prova COM – 3/8” – X**

O Corpo de prova foi conformado por um colmo de bambu de 433 mm de comprimento, 129 mm de diâmetro e 13 mm de espessura das paredes. Foram colocadas duas peças terminais dispostas em cruz, do tipo L25mm-P9,5mm(3/8”), no topo do colmo e na base foi colocado um suporte de borracha para evitar o deslocamento do corpo de prova. O comprimento total do corpo de prova foi de 489 mm e seu peso de 3,27 kg (Figura 58).



**Figura 58.** Procedimento do ensaio de compressão no corpo de prova COM – 3/8” – X.

As peças terminais da ligação começaram a apresentar deformações ao redor de **17 kN**, porém os terminais trabalharam sem falha até a carga de **30 kN**, quando a prensa entrou em contato com o colmo, por causa do achatamento dos terminais. A pressão na superfície do terminal deformou os elementos metálicos fazendo com que as partes inclinadas do terminal fizessem pressão nas paredes do bambu, gerando fortes rachaduras no colmo por tração perpendicular às fibras. No entanto, a prensa não estabeleceu um ponto de falha, pois a deformação das peças foi de maneira lenta e continua, até apoiar na Guadua. Assim, os dados foram coletados até o momento anterior ao contato entre a prensa e o colmo. O bambu na sua base não sofreu alterações físicas visíveis (Figura 59).



**Figura 59.** Estado do corpo de prova COM – 3/8” – X após o ensaio.

### **Ensaio 7. Corpo de prova COM – 1/2” – L**

O corpo de prova esteve conformado por um colmo de bambu de 450 mm de comprimento, 124 mm de diâmetro e 12 mm de espessura das paredes. Foi colocada uma peça terminal do tipo L38mm-P12,5mm(1/2”) no topo do colmo e na base foi colocado um suporte de borracha para evitar o deslocamento do corpo de prova. O comprimento total do corpo de prova foi de 509 mm e seu peso foi de 2,74 kg (Figura 60).



**Figura 60.** Procedimento do ensaio de compressão no corpo de prova COM – 1/2” – L.

A ruptura do corpo de prova sob compressão aconteceu na carga de **16,19 kN**, por falha da Guadua. A pressão na superfície do terminal deformou o elemento metálico fazendo com que as partes inclinadas empuxassem as paredes do bambu gerando a falha no colmo por tração perpendicular às fibras. O bambu na sua base não sofreu alterações físicas visíveis (Figura 61).



**Figura 61.** Estado do corpo de prova COM – 1/2” – L após o ensaio.

### **Ensaio 8.** Corpo de prova COM – 1/2” – X

O corpo de prova foi conformado por um colmo de bambu de 380 mm de comprimento, 130 mm de diâmetro e 14 mm de espessura das paredes. Foram colocadas duas peças terminais dispostas em cruz, do tipo L38mm-P12,5mm(1/2”), no topo do colmo. Na base foi colocado um suporte de borracha para evitar o deslocamento do sistema. O comprimento total do corpo de prova foi de 418 mm e seu peso foi de 3,68 kg (Figura 62).



**Figura 62.** Procedimento do ensaio de compressão no corpo de prova COM – 1/2" – X.

As peças terminais começaram a apresentar deformações ao redor da carga de **19 kN**, depois os terminais trabalharam sem falha até a carga de **31,86 kN** quando a prensa se apoiou no colmo. A pressão na superfície do terminal deformou os elementos metálicos fazendo com que as partes inclinadas do terminal fizessem pressão nas paredes do bambu, gerando fortes rachaduras no colmo por tração perpendicular às fibras. Da mesma maneira que no ensaio 6, a prensa não estabeleceu um ponto de falha, pela deformação lenta e continua das peças até apoiar na Guadua. Por essa razão, os dados coletados foram do momento anterior ao contato entre a prensa e o colmo. O bambu na sua base não sofreu alterações físicas visíveis (Figura 63).

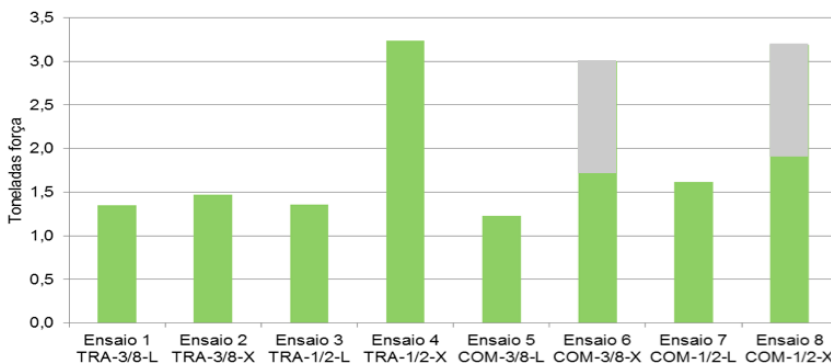


**Figura 63.** Estado do corpo de prova COM – 1/2" – X após o ensaio.

### 4.5.3. Análise de resultados dos ensaios de laboratório

Levando em conta os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, fez-se a conversão dos valores alcançados, de kN para *toneladas força* visto que é uma unidade de fácil reconhecimento na avaliação de cargas para elementos estruturais, considerando que 1 kN força é equivalente a 0,1 tonelada força. Além disso, os dados foram convertidos para MPa, com o intuito de possibilitar a sua comparação com os valores admissíveis para o bambu GAK definidos na NSR-10 (Tabela 5).

Na figura 64, se faz evidente que a ligação submetida à tração atingiu valores de 3,30 toneladas, na sua melhor configuração: tipologia L38mm-P12,5mm(1/2") em cruz. Para os demais corpos de prova submetidos à tração a resistência ficou entre 1,38 e 1,50 toneladas. Em relação aos ensaios de compressão, as amostras atingiram resistências entre 1,25 e 1,65 toneladas para as configurações com uma peça terminal unicamente. Nas configurações em cruz as resistências ficaram ao redor de 3 toneladas, no entanto as deformações nos terminais se apresentaram ao redor de 1,8 toneladas força.



**Figura 64.** Comparação dos resultados dos ensaios de laboratório. A faixa cinza representa os valores atingidos durante a deformação mas sem falha do elemento.

A norma NSR-10 define os seguintes valores como tensões admissíveis para colmos de bambu GAK de 12% de coeficiente de umidade. Os valores são fornecidos em Mpa (Tabela 5).

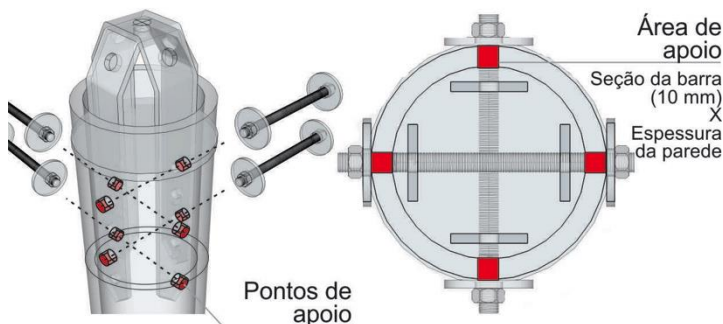
**Tabela 5.** Tensões admissíveis para o bambu GAK segundo a NSR-10  
(Valores em MPa)

<b>Flexão</b>	<b>Tração</b>	<b>Compressão paralela ao eixo longitudinal</b>	<b>Compressão perpendicular ao eixo longitudinal</b>	<b>Corte</b>
15	18	14	1,4	1,2

Assim, foi feita a conversão dos valores obtidos em kN para MPa, com o intuito de comparar a resistência da ligação em suas diferentes configurações e dimensões com a norma de referência. Tendo que  $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$ , os valores obtidos em kN foram levados a N e divididos pela área de contato das peças terminais no colmo, em  $\text{mm}^2$ .

A área de contato foi estabelecida pelo sistema de fixação, contando para o cálculo, a área dos pontos de contato das barras rosqueadas de fixação do terminal com o colmo de bambu. Para determinar o valor da área foi multiplicada a seção da barra pela espessura das paredes do colmo e pelo número de pontos de contato. Na figura 65 é ilustrado esse procedimento.





**Figura 65.** Determinação da área de contato de transmissão de esforços na Guadua.

Na tabela 6, são apresentados os valores de resistência da ligação em kN e MPa para cada corpo de prova. Além, é calculada a porcentagem de resistência quando comparado com os valores de tensões admissíveis fornecidos pela norma NSR-10 para estruturas de GAK.

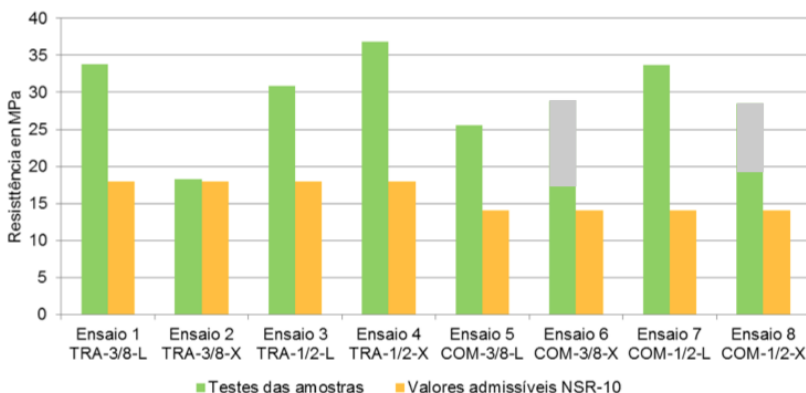
**Tabela 6.** Resultados dos ensaios em MPa e comparativo com as tensões admissíveis da GAK segundo a NSR-10.

Corpo de prova	Ponto de falha em kN	Resistência em MPa	% de resistência /norma
TRA-3/8"-L	13,52	33,80	187,7%
TRA-3/8"-X	14,67 <sup>a</sup>	18,33	101,8%
TRA-1/2"-L	13,59	30,88	171,6%
TRA-1/2"-X	32,40 <sup>a</sup>	36,81	204,5%
COM-3/8"-L	12,25	25,52	182,3%
COM-3/8"-X	17,00 <sup>b</sup>	16,35	116,8%
COM-1/2"-L	16,19	33,73	240,9%
COM-1/2"-X	19,00 <sup>b</sup>	16,96	121,2%

<sup>a</sup> = A falha apresentou-se na barra rosqueada de sujeição à prensa

<sup>b</sup>= O calculo se fez com os valores do inicio da deformação das peças.

Na figura 66, faz-se evidente que nos ensaios de tração, o comportamento dos terminais colocados em cada extremo do colmo foram similares nos diferentes corpos de prova. Isso corrobora que o desempenho das peças nos ensaios será bastante similar ao comportamento da ligação quando instalada em estruturas reais. Mesmo quando as percentagens apresentadas pelos corpos de prova de tração com configuração linear foram maiores do que no corpo de prova TRA-3/8-X, as configurações em cruz tiveram o melhor desempenho, toda vez que a falha foi na barra rosqueada de suporte e tanto o colmo quanto os terminais não sofreram grandes alterações.



**Figura 66.** Comparação dos resultados dos ensaios de laboratório com os valores admissíveis da norma NSR-10. A faixa cinza representa os valores atingidos durante a deformação mas sem falha do elemento.

A pressão exercida no terminal provocou a deformação da peça fazendo com que as partes inclinadas do terminal fizessem pressão nas paredes do bambu, gerando fortes rachaduras no colmo por tração perpendicular às fibras, gerando a falha nos ensaios 5 e 7. Nos ensaios 6 e 8, com sistema de terminais cruzadas, a prensa não estabeleceu um ponto de falha pois a deformação das peças foi de maneira lenta e contínua, até a prensa apoiar no colmo de bambu Guadua. Os dados coletados

para esses ensaios foram do início da deformação das peças e na faixa cinza do momento prévio ao contato entre a prensa e o colmo, garantindo a comparabilidade dos dados.

Uma estratégia para aumentar o desempenho da ligação frente aos esforços axiais de compressão é utilizar elementos de amarração, tipo braçadeira, no extremo do colmo. As braçadeiras metálicas de alta resistência já são utilizadas em ligações de bambu. Outra opção é criar peças terminais com abas soldadas interiormente para reforçar aos esforços de flexão na peça (Figura 67).



**Figura 67.** (1) Falha da ligação submetida à compressão. (2) Braçadeiras metálicas de alta resistência. (3) Terminal com aba soldada.

#### 4.6. ANÁLISE ECONÔMICA DA LIGAÇÃO

Baseado nos dados fornecidos pela siderúrgica ingenox, da produção do terminal por quantidades e em valores no mercado colombiano dos elementos complementares da ligação, é feito um orçamento dos elementos que compõem o sistema de ligação.

A industrialização dos processos de fabricação do terminal, com processos de troquelado por exemplo e a massificação da produção, podem gerar diminuição nos custos das peças. Na tabela 7, são apresentados os valores de produção das duas tipologias de terminais por quantidade de fabricação e o custo

comercial dos elementos de fixação: barras rosqueadas de 9,5mm, arruelas e porcas.

**Tabela 7.** Valores comerciais dos elementos constitutivos do sistema de ligação para o mês de julho de 2015.

Elemento	Quantidade	Unidades	Valor Unitário		
			COP	BRL	USD
Terminal L38mm-P12,5mm(1/2")	1 a 50	Unds	\$11.450	\$13,65	\$3,95
Terminal L38mm-P12,5mm(1/2")	51 a 500	Unds	\$10.850	\$12,94	\$3,74
Terminal L38mm-P12,5mm(1/2")	501 a 1000	Unds	\$10.300	\$12,28	\$3,55
Terminal L38mm-P12,5mm(1/2")	Mais de 1000	Unds	\$9.800	\$11,68	\$3,38
Terminal L25mm-P9,5mm(3/8")	1 a 50	Unds	\$10.300	\$12,28	\$3,55
Terminal L25mm-P9,5mm(3/8")	51 a 500	Unds	\$9.750	\$11,62	\$3,36
Terminal L25mm-P9,5mm(3/8")	501 a 1000	Unds	\$9.300	\$11,09	\$3,21
Terminal L25mm-P9,5mm(3/8")	Mais de 1000	Unds	\$8.800	\$10,49	\$3,03
Barra rosqueada 3/8"	1	m	\$3.600	\$4,29	\$1,24
Porca + arruela 3/8"	1	Unds	\$129	\$0,15	\$0,04

O terminal pode-se considerar um elemento de construção econômico, ainda mais quando produzida em grandes quantidades. Nesse cenário, o terminal tem uma redução de quase 15% quando sua produção é por cima de 1000 unidades.

Faz-se claro que o momento no qual é feito o orçamento (julho de 2015) o peso colombiano (COP) apresenta uma grande desvalorização frente ao dólar estadunidense (USD), de quase o 50%.

Já na tabela 8, se apresenta um consolidado do custo de um sistema de ligação, para o caso, conformado por um terminal, duas barras rosqueadas de 15cm de comprimento, quatro porcas e quatro arruelas.

**Tabela 8.** Valores comerciais das diferentes tipologias de sistemas de ligação para o mês de julho de 2015.

Tipologia e configuração do terminal	Quantidade					
	1 a 50 unds	Mais de 1000 unds	1 a 50 unds	Mais de 1000 unds	1 a 50 unds	Mais de 1000 unds
	Valor COP		Valor BRL		Valor USD	
Ligação com uma terminal L38mm-P12,5mm(1/2")	\$13.046	\$11.396	\$15,55	\$13,59	\$4,50	\$3,93
Ligação com dois terminais L38mm-P12,5mm(1/2") em cruz	\$26.092	\$22.792	\$31,11	\$27,17	\$8,99	\$7,86
Ligação com uma terminal L25mm-P9,5mm(3/8")	\$11.896	\$10.396	\$14,18	\$12,39	\$4,10	\$3,58
Ligação com dois terminais L25mm-P9,5mm(3/8") em cruz	\$23.792	\$20.792	\$28,37	\$24,79	\$8,20	\$7,17

Pode-se observar que o custo do sistema de ligação com o terminal da tipologia L25mm-P9,5mm(3/8") diminui em 8,8%, em relação com o sistema do terminal L38mm-P12,5mm(1/2"). No análise não foram considerados os diferentes tipos de conectores, que são produzidos sob encomenda conforme ao tipo de estrutura. A ligação desenvolvida é um sistema econômico em relação às possibilidades construtivas que fornece e os processos que implica, fazem dela uma peça com uma grande potencial de produção e comercialização visando seu uso tanto em edificações maiores quanto em desenvolvimentos com orçamento limitado.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A seguir se apresentam as conclusões mais relevantes do processo de criação, desenvolvimento e análises da ligação.

### 5.1. CONCLUSÕES

Baseado nos parâmetros definidos no início do processo de desenvolvimento da ligação pode-se concluir que:

Em quanto ao desempenho da ligação:

- O terminal fornece uma grande versatilidade na configuração de estruturas, ainda mais quando combinado com elementos de conexão produzidos especialmente para o tipo de estrutura a desenvolver.
- O processo de montagem da peça terminal no bambu Guadua, tanto na elaboração das amostras para os ensaios quanto na construção do protótipo (apresentado no Apêndice A), foi feito de maneira ágil, levando aproximadamente 7 minutos na montagem de um terminal ao colmo.
- Igualmente a peça terminal adaptou-se, em todos os casos, ao colmo de Guadua denominado comercialmente como Guadua de 12cm de diâmetro.
- O material dos elementos da ligação fazem dela um sistema durável, ainda mais com a proteção adequada. Pode-se assumir que a ligação teria uma vida útil maior do que o bambu mesmo.
- A montagem da ligação na conformação de estruturas não exigiu processo de soldagem.
- O funcionamento e montagem da peça, fazem com que sua utilização na construção de estruturas possa ser feita com poucos operários que não requerem qualificação especial, como demonstrado na execução do protótipo.

- O processo de fabricação da peça terminal pode ser feito de maneira industrial e massiva, favorecendo a pré-fabricação de partes da estrutura.

Em quanto à segurança do sistema, pode-se falar que:

- A ligação apresenta bom desempenho estrutural, toda vez que nos ensaios realizados ultrapassou os valores de referência de tensões admissíveis fornecidos para elementos estruturais com a GAK na norma NSR-10.
- O melhor desempenho da ligação dá-se em relação aos esforços axiais de tração. Isso é possível pela forma do terminal e o sistema de fixação ao colmo em vários pontos.
- Mesmo nos ensaios de resistência à compressão atingiram os valores de admissíveis de referencia na norma NSR 10, as deformações nas peças terminais podem ocasionar rachaduras nos colmos.
- Para os terminais submetidos a grandes cargas de compressão na estrutura, é recomendável reforçar esses elementos, seja com abas soldadas, braçadeiras metálicas ou entrenós preenchidos de concreto. Baseado na experiência da ligação Velez, colocar o concreto no entrenó no qual se realiza a ligação, supõe maior resistência quando submetida a compressão. Essa alternativa pode ser significativa na resistência das ligações conectadas às fundações da construção.
- Na execução do protótipo em escala natural (apresentado no Apêndice A), se evidenciou a estabilidade estrutural do sistema construído com a ligação fornecendo uma ideia de seu desempenho real numa edificação. No entanto é preciso finalizar a construção do protótipo com o intuito de conhecer tal desempenho.
- Pode-se inferir que a peça terminal feita de aço estrutural, como exigido nas normas NSR-10 e a NBR 8800, tem resistência ao fogo mínima para os elementos estruturais,



ainda mais com a possibilidade que fornecem as peças de revestimentos contra o fogo.

Em relação à manutenção da ligação:

- Embora o sistema de ligação ainda não tenha sido utilizado numa edificação permanente, conforme a seu funcionamento pode-se inferir que a manutenção dos elementos pode ser de maneira ágil, pois os elementos não são fixados por soldagem nem por concreto nos entrenós. Além disso, não requerem ferramentas especiais para sua montagem e desmontagem.

Em quanto ao custo da ligação, pode-se falar que:

- Conhecido o desempenho estrutural das duas tipologias de terminal desenvolvidas e seu custo dentro do sistema de ligação, se conclui que o tipo L38mm-P12,5mm(1/2") é a melhor opção fabricação e comercialização, toda vez que seu desempenho nos ensaios de tração e compressão foi maior em relação ao terminal do tipo L25mm-P9,5(3/8"). Além disso, tem-se que o custo do terminal do segundo tipo só diminui em 8,8%, em relação com a primeira.
- Também, a autonomia do terminal em relação aos elementos de conexão possibilitam o baixo custo da ligação, tanto na construção quanto na manutenção, podendo ser adquiridas unicamente as peças que vão compor a estrutura.

Finalmente, em relação ao parâmetro de estética da ligação:

- Pode-se dizer que, mesmo sendo um parâmetro não quantificável, o resultado formal da peça terminal é satisfatória. A proporção da terminal em relação ao colmo de bambu é correta e não representa uma forma estranha dentro do sistema da estrutura. Igualmente, o terminal

pode-se personalizar com diferentes tintas que, além do proteger a peça, significa maiores possibilidades na estética da edificação.

Pela forma e material do terminal, que é o corpo principal da ligação, é possível industrializar sua produção. Os processos de fabricação são processos básicos de dobra e perfuração que podem ser feitos numa siderúrgica nacional. O anterior tem repercussão tanto no custo do terminal quanto na difusão do sistema, ainda mais quando os outros elementos que complementam a ligação são comerciais, como as barras rosqueadas, porcas e arruelas.

Finalmente, como recomendação para melhorar o desempenho da ligação pode-se utilizar arruelas de borracha sob as arruelas metálicas. Elas fornecem proteção da camada exterior do colmo no ponto de contato e evita a infiltração da água nas cavidades do colmo diminuindo as patologias na estrutura.

## 5.2. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para trabalhos futuros, poder-se-ia testar a resistência do sistema de ligação aos esforços tanto de compressão quanto de tração, com a aplicação de concreto no entrenó no qual se realiza a ligação. Poderia se, com essa solução, reduzir a deformação dos terminais e seus efeitos no colmo. Igualmente, em trabalhos futuros seria muito interessante testar o desempenho estrutural da ligação com os elementos de conexão desenvolvidos, como por exemplo a secção tubular ou os conectores para a conformação de domos.

Embora existem normas para o cálculo de estruturas com bambu *Guadua* como já visto, a construção de elementos em escala natural fornece uma experiência importante na análise da

construção com bambu. O comportamento dos elementos estruturais em protótipos em escala natural é um método usualmente utilizado pelos arquitetos, como Simón Velez, e construtores com bambu Guadua na Colômbia no processo de projeto. Assim, tem uma relevância importante no desenvolvimento de futuras pesquisas a construção de protótipos para as análises.

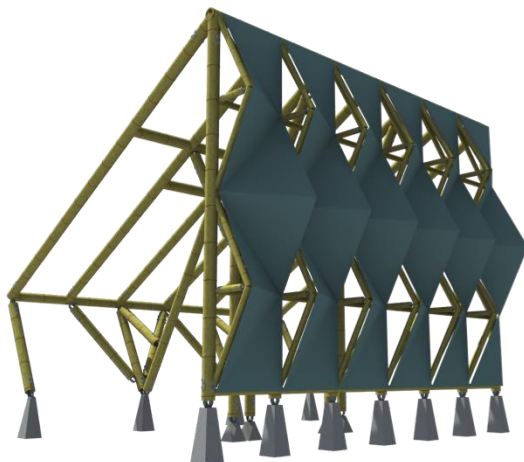


## **APÊNDICE A: PESQUISA APLICADA. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO**

Após obter bons resultados nos ensaios de limite de resistência no laboratório, foi projetada uma edificação com um espaço multifuncional de aproximadamente 16m<sup>2</sup>. O intuito da pesquisa aplicada foi avaliar a implementação da ligação desenvolvida num edifício desde a etapa de projeto até sua execução. Pretendeu-se assim, verificar na obra o cumprimento, ou não, dos parâmetros de pré-montagem da ligação, agilidade de montagem na obra, a estabilidade estrutural e a sua estética. Além disso, procurou-se comprovar a versatilidade formal que admite o elemento de ligação para a construção de diversas tipologias de edificações.

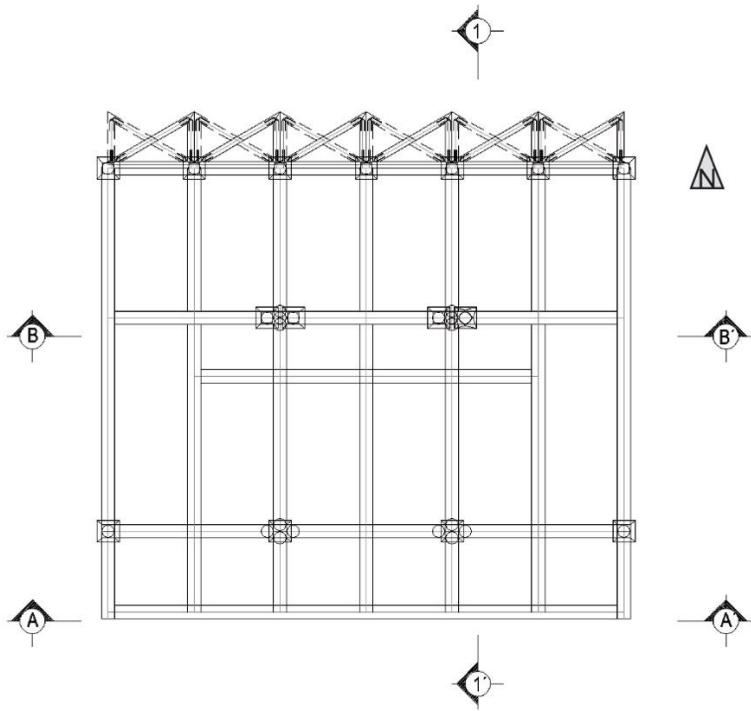
### **DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE EDIFICAÇÃO**

O projeto foi pensado como um espaço ambivalente de forma que não se encaixa-se numa tipologia específica e pudesse adotar formas arquitetônicas complexas, aplicáveis a edificações com outros usos. O foco do projeto foi a utilização do sistema de ligação em várias de suas possíveis configurações, tendo conexões terminal-colmo, terminal-terminal e terminal-fundação em diferentes ângulos. Permitindo a avaliação da ligação em diversas possibilidades de uso. (Figura 68)



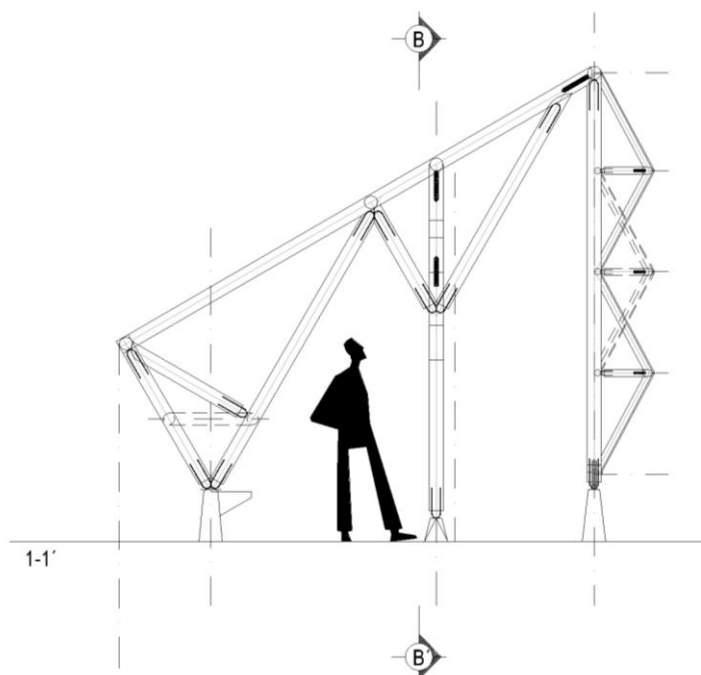
**Figura 68.** Isométrico fachada Norte do protótipo.

O protótipo de um andar, tem planta quadrada e a estrutura é baseada principalmente em elementos verticais e inclinados a  $60^\circ$ , respondendo ao contexto climático de Medellín (Figura 69).

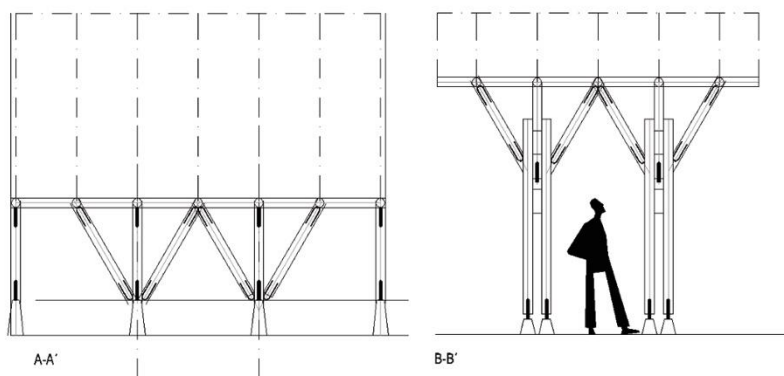


**Figura 69.** Planta arquitetônica do protótipo.

Na fachada Sul foram projetas colunas em forma de “V” inclinadas, tanto no sentido Norte-Sul quanto no Leste-Oeste. No interior da edificação tem apoios de dupla coluna combinada, nas quais apoiam-se elementos inclinados a  $60^\circ$  em relação com o plano do piso (Figuras 70 e 71).



**Figura 70.** Corte 1-1 (Norte – Sul) do protótipo.

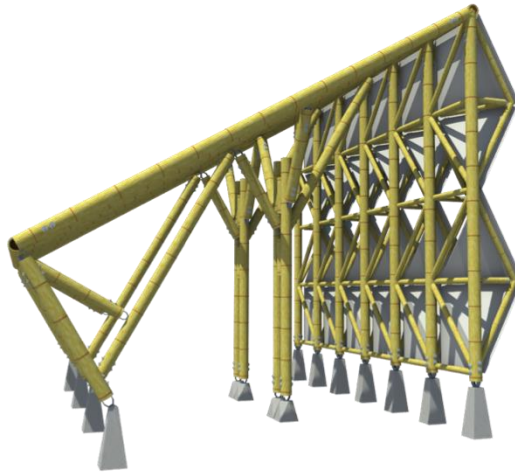


**Figura 71.** Cortes A-A e B-B (Leste – Oeste) do protótipo.

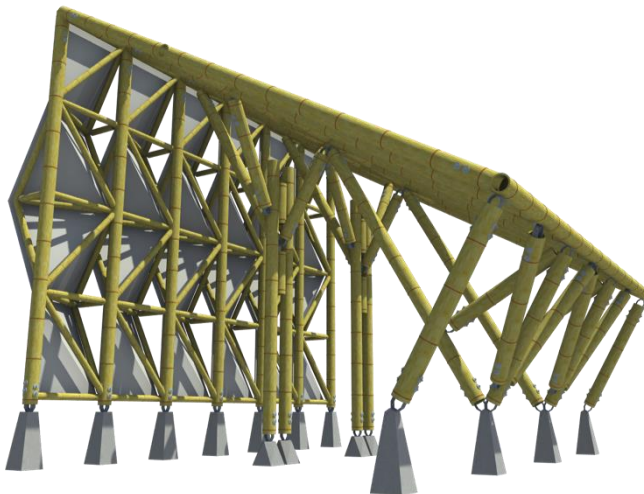


Já na fachada Norte foi projetado uma malha espacial com elementos de bambu *taquara* de 6cm de diâmetro, utilizando uma terminal adaptada ao diâmetro. Nessa fachada foi projetada a instalação de painéis na superfície exterior, deixando aberturas para ventilação e iluminação.

A seguir são apresentados isométricos que ilustram o projeto do protótipo (Figuras 72 e 73).



**Figura 72.** Isométrico Sul-leste do protótipo.



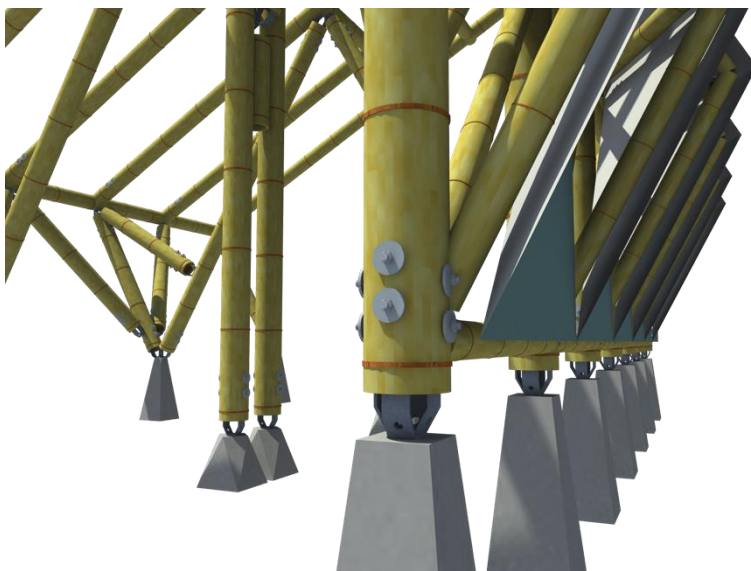
**Figura 73.** Isométrico Sul-oeste do protótipo.

## CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA CONSTRUTIVO

A seguir são detalhados os subsistemas da edificação.

### Subsistema de fundação

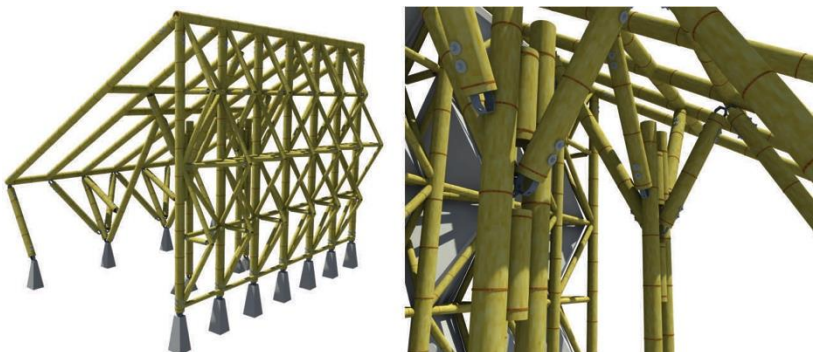
A solução adotada para o subsistema de fundação foi uma laje reforçada com vigas de fundação e pilares que sobressaem da laje, nos quais apoia-se o subsistema de estrutura. Os pilares situados no interior sobressaem 20cm do piso, enquanto os pilares localizados na periferia têm 45cm de altura, para evitar o contato dos colmos da estrutura com o solo e a água (Figura 74). A conexão entre o subsistema de fundação com a estrutura é realizada por meio de parafusos ou barras rosqueadas de ancoragem incorporadas nos pilares, conectadas às terminais fixadas nos extremos dos colmos. São utilizadas terminais tanto em configuração linear quanto em cruz.



**Figura 74.** Detalhe conexão entre o subsistema de fundação e a estrutura.

## Subsistema de estrutura

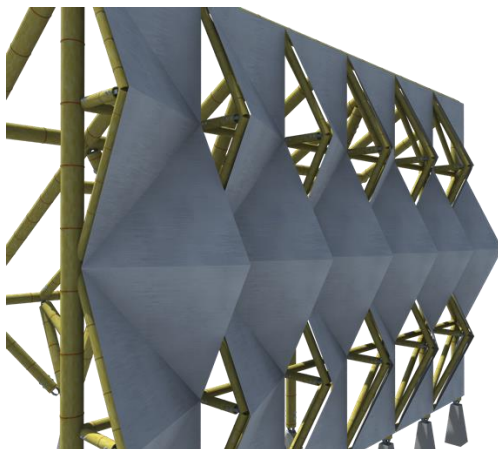
A estrutura de bambu Guadua é conformada por colmos entre 0,90 e 4,50 metros de longitude, que configuram sistemas bidimensionais tipo treliças que se repetem no sentido Leste-Oeste, interligadas entre elas com elementos inclinados e horizontais de cobertura. Para fazer as uniões dos elementos, foi utilizado o sistema de ligação desenvolvido com terminais da tipologia L38mm-P12,5mm(1/2"). A conexão das terminais com outras terminais se realiza com parafusos de 12,5mm de diâmetro e 25mm de comprimento. Já a conexão entre terminais e colmos se faz com barras rosqueadas de 12,5mm de longitude, em alguns casos dobrando-a para conseguir a ligação no ângulo desejado (Figura 75).



**Figura 75.** Detalhes do sistema de ligação utilizado na estrutura.

## Vedações verticais e cobertura

Baseado na versatilidade dois sistemas construtivos com bambu, foram projetadas vedações de diferentes tipos tanto nas fachadas quanto na cobertura. No projeto, a fachada Sul é uma parede de pau-a-pique com solo estabilizado e esterilha de bambu. Tanto nas fachadas Leste e Oeste, quanto na cobertura, é utilizado um painel metálico tipo sanduíche com isolamento térmico. Por fim, na fachada Norte é usado um painel metálico cobrindo uma malha espacial, (Figura 76).



**Figura 76.** Fachada norte com vedação de painel metálico.

### **Quantificação dos materiais e orçamento**

A estrutura projetada utiliza terminais da tipologia L38mm-P12,5mm(1/2") em todos seus pontos de ligação, tanto entre elementos quanto na conexão com os pilares base. Isso representa uma grande quantidade de terminais utilizadas, mas também, significa que a totalidade dos elementos tem uma pré-montagem do sistema de ligação, poupando tempo na obra e facilitando a manutenção.

Com o intuito de ter uma noção das peças utilizadas no projeto do protótipo e seu custo, apresenta-se, na tabela 9, uma quantificação e orçamento de elementos que compõem o sistema de estrutura do projeto. No listado não foram considerados elementos de vedações, coberturas, redes, etc. Também não foi considerada a estrutura de malha espacial da fachada Norte. Os custos dos elementos são do mercado colombiano e convertidos a moeda brasileira e norte-americana. Novamente, se faz a claridade que o momento no qual é feito o orçamento (julho de 2015) o peso colombiano (COP) apresenta uma importante desvalorização frente ao dólar estadunidense (USD).

**Tabela 9.** Quantificação e orçamento de materiais da estrutura do protótipo

Elemento	Quant.	Unidades	Valor Unitário		
			COP	BRL	USD
Terminal L38mm-P12,5mm(1/2")	77	Unds	\$835.450	\$996,05	\$287,95
Barra rosqueada 3/8"	23	m	\$82.800	\$98,72	\$28,54
Barra rosqueada 1/2"	14	m	\$50.400	\$60,09	\$17,37
Porca + arruela 3/8"	308	Unds	\$39.732	\$47,37	\$13,69
Guadua Ø12cm *	21	Colmo (6m)	\$567.000	\$676,00	\$195,42
Parafusos 1/2"	4	Unds	\$2.800	\$3,34	\$0,97
Porca + arruela 1/2"	70	Unds	\$23.100	\$27,54	\$7,96
Fundação (Concreto + Aço)	1	----	\$1.300.000	\$1.549,90	\$448,06
<b>TOTAL **</b>			<b>\$2.901.282</b>	<b>\$3.459</b>	<b>\$1.000</b>

\*A quantidade de Guadua foi calculada considerando a quantidade necessária com um incremento do 10% de desperdício. \*\* O total do investimento foi calculado unicamente para o sistema da estrutura. Não foram considerados os valores de transporte de materiais ou mão de obra.

## PROCESSO CONSTRUTIVO DO PROTÓTIPO

Para verificar a viabilidade construtiva do protótipo foi necessário construir, em escala natural, uma seção da estrutura do edifício. Assim, foi selecionada uma das treliças conformada por um apoio em V (eixo Sul), uma coluna (eixo central) e uma viga da cobertura, além de elementos de reforço.

Para a fabricação da estrutura foi utilizada Guadua comercial de 12cm (de diâmetro) imunizada, polida e com processo de secagem em forno até alcançar o coeficiente de 12% de umidade. Inicialmente foram feitos os cortes dos colmos com as dimensões, ângulos e tipo de corte necessários. Após, foi

feita a montagem dos terminais nos colmos conforme ao projeto, (Figura 77). A montagem de uma terminal levou 7 minutos na média, foi necessário a perfuração da parte interna do nó, sendo 4 minutos e 40 segundos para as perfurações do colmo e 2 minutos e 20 segundos para a fixação do terminal. Para colmos que não precisavam a perfuração interna o tempo requerido foi de 4 minutos e 20 segundos.



**Figura 77.** Cortes dos colmos e montagem dos terminais.

Já na obra, foi feita a montagem dos colmos fazendo a conexão entre os elementos da treliça deitados no solo e posteriormente erguendo o sistema. A montagem da treliça na obra levou menos de uma hora e ocorreu sem desperdício de materiais. Foram necessários somente dois operários para o montagem e não precisou de ferramentas ou maquinarias especiais, (Figura 78).





**Figura 78.** Montagem dos colmos no lugar de construção.

Além, foram realizadas, para a execução da estrutura, ligações com elementos com corte reto, boca de peixe e bico de flauta. Igualmente foram utilizadas conexões entre terminais e conexões terminal-colmo fazendo, em alguns casos, dobra nas barras rosqueadas. Na coluna vertical foram utilizados dois terminais em cruz na conexão com o pilar de fundação, reforçando o colmo com braçadeira metálica. Na figura 79, apresentam-se detalhes dos pontos de ligação do montagem na obra.



**Figura 79.** Detalhes de pontos de ligação com as terminais desenvolvidas.

A parte executada da estrutura apresentou uma ótima estabilidade física e se conseguiu o visual estético desejado tanto das ligações quanto do conjunto, (Figuras 80 e 81). As terminais receberam um acabamento com tinta de proteção à corrosão cor vermelha, que dá aos elementos maior vida útil considerando que podem estar expostos os elementos climáticos, além de fornecer-lhes uma estética interessante.



**Figura 80.** Resultado final da estrutura construída.



**Figura 81.** Resultado final da estrutura construída.



Na figura 82 é apresentada a porção do protótipo que foi executada, em comparação com o projeto do protótipo completo. A parte construída da estrutura é uma boa representação da complexidade e linguagem arquitetônica do projeto e permite verificar o atendimento do sistema aos parâmetros de versatilidade e facilidade na montagem. O que finalmente exhibe o sistema como uma alternativa real para a construção de edificações.



**Figura 82.** Estrutura construída em relação ao projeto completo do protótipo.



## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em edifícios, 2008.
- CARBONARI, G.; ABE, C. H.; HENRIQUE PEDROSA, N. *Projeto de Determinação Experimental das Propriedades Físicas e Mecânicas de Diversas Espécies de Bambu Oriundas do IAPAR/Londrina*. . Londrina, Brasil: Universidade Estadual de Londrina – Centro de Tecnologia e Urbanismo/Departamento de Estruturas, 2012.
- CARDOSO, R. *Arquitetura com Bambu*. 2000. UNIDERP Universidade para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal, 2000.
- FLANDER, K. DE; ROVERS, R. One laminated bamboo-frame house per hectare per year. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, p. 210–218, jan. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006180800010X>> . Acesso em: 24 mar. 2014.
- GARCIA-SAENZ, M. Social and Cultural Aspects of Constructions with Bamboo. *10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2012.
- GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.1, p. 107–114, 2005.
- HIDALGO, O. *Manual de construcción con bambu*. Bogotá, Colombia: Estudios Técnicos Colombianos Ltda., 1981.
- HIDALGO, O.; DICKINSON, S. *Bamboo: The gift of the gods*. . Bogotá, Colombia: O. Hidalgo-Lopez. , 2003

ISO 22157 *Bamboo - Determination of physical and mechanical properties*. . Switzerland: International Organization for Standardization. , 2004

JANSSEN, J. J. A. *Designing and Building with Bamboo*. [S.l.]: International Network for Bamboo and Rattan INBAR, 2000.

JAYANETTI, D. L.; FOLLET, P. R. *Bamboo in construction: an introduction*. [S.l.]: International Network for Bamboo and Rattan INBAR, 1998.

JUDZIEWICZ, E. *et al. American Bamboos*. Washington, D.C., USA.: Smithsonian Institution Press, 1999.

JUDZIEWIEZ, E. *et al. Catalogue of New World Grasses (Poaceae): I. Subfamilies Anomochlooideae, Bambusoideae, Ehrharttoideae, and Pharoideae*. . Washington, USA: Smithsonian Institution Press. , 2000

KUMAR, S.; DEV, T. *Bamboo Preservation Techniques: A Review*. [S.l.]: International Network for Bamboo and Rattan INBAR and Indian Council of Forestry Research Education, 1994.

LIESE, W. *Anatomy and Properties of Bamboo*. *International Networt for Bamboo and Rattan INBAR*, 1985.

LONDOÑO, X. *et al. Characterization of the anatomy of Guadua angustifolia (Poaceae: Bambusoideae) culms*. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society* 16, v. 16, p. 18–31, 2002.

LONDOÑO, X. *Diversity and distribution of new world bamboos, with special emphasis on the bambusease*. 08. ed. [S.l.]: International Network for Bamboo and Rattan INBAR, 1996.

LONDOÑO, X. *Evaluation of bamboo resources in latin america*. *International Networt for Bamboo and Rattan INBAR*, v. 35, n. 96, p. 30, 2001.

LONDOÑO, X.; PETERSON, P. *Guadua Chacoensis (Poaceae: Bambuseae), its Taxonomic Identity, Morphology and Affinities*. . St. Louis. USA: Missouri Botanical Garden Press. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/3391607>>. , 1992

MINKE, G. *Building with Bamboo: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhauser, Basel, 2012

NARAYANAMURTY, D.; MOHAN, D. *Utilización del bambú y de la caña en la construcción*. New York, USA: Naciones Unidas. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, 1972.

*Norma técnica E. 100 Bambú. Reglamento Nacional de Edificaciones*. . Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Republica de Perú. Disponível em: <<http://www.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/normas/>>. , 2012

OBERMAN, T. M.; LAUDE, R. *Bambú: Recurso sostenible para estructuras espaciales*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2004.

REN21. *Renewables Global Status Report*. Acessado em: julho 2015. Disponível em: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>

RIAÑO, N. M. *et al.* Plant growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in the Valle del Cauca – Colombia. *The Journal of the American Bamboo Society*, v. 16, n. 1, p. 43–51, 2002.

SILVA, F. H. B. B; LOPES SILVA, M. S.; CAVALCANTI, A. C. *Descrição das principais classes de solos*. Brasília: Embrapa, Set. 2005.

SOUSA, S. *Estruturas em Bambu*. 2013. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

SUNGKAEW, S. *et al.* Non-monophyly of the woody bamboos (Bambuseae; Poaceae): a multi-gene region phylogenetic analysis of Bambusoideae s.s. *Journal of plant research*, v. 122, n. 1, p. 95–108, jan. 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19018609>>. Acesso em: 1 jul. 2014.

STAMM, J. La Evolución de los Métodos constructivos en Bambú Segundo Congreso Mexicano del Bambú Puebla, México, 2008.

TAKEUCHI, Caori. 2003 “Comportamiento estructural de la guadua. Uniones en Guadua”. Seminario sobre arquitectura e Ingeniería de la Guadua. Comité Colombiano para la Normalización del Bambú-Guadua. Bogotá. Abril 2003.

*Título G: Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.* . Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. , 2010

TRIGO, J. T. Tecnologia da Construção de Habitação. Lisboa: LNEC, 1978.

VELEZ, S. *Lecture by Simón Vélez and interview.* . New York, USA, USA: The architectural league NY, 2011. Disponível em: <<http://archleague.org/2011/03/interview-simon-velez/>>.

VELEZ, S.; VEGESACK, A.; KRIES, M. *Grow your own house: Simón Vélez and bamboo architecture.* . Weil am Rhein, Germany.: Vitra Design Museum. , 2000

## ANEXO A. RESULTADOS ENSAIOS DO LABORATORIO



### ENSAYO DE CARGA AXIAL EN CONEXIONES METALICAS DE GUADUA

FECHA: Marzo 13 de 2015 ENSAYO: E020-2015  
 INTERESADO: Carlos Andrés Sánchez Quintero  
 PROCEDENCIA: Particular  
 MATERIAL: Ocho (08) acoples metálicos para construcción en guadua

## RESULTADOS

ENSAYO DE CARGA AXIAL A TRACCION EN CONEXIONES METALICAS EN GUADUA							
PROBETA	MASA	LONGITUD		DIAMETRO		CARGA MAXIMA	FALLA POR
		PROBETA	GUADUA	TIPO	DIAMETRO		
		TOTAL	EXTERIOR	CONECTOR	PERNOS		
#	kg	mm				kN	
1	2,71	840	120	LINEAL	3/8"	13,52	GUADUA
2	3,85	820	120	CRUZ	3/8"	14,67	PERNO
3	3,32	750	130	LINEAL	1/2"	13,59	GUADUA
4	5,32	795	125	CRUZ	1/2"	32,40	PERNO
ENSAYO DE CARGA AXIAL A COMPRESION EN CONEXIONES METALICAS EN GUADUA							
PROBETA	MASA	LONGITUD		DIAMETRO		CARGA MAXIMA	FALLA POR
		PROBETA	GUADUA	TIPO	DIAMETRO		
		TOTAL	EXTERIOR	CONECTOR	PERNOS		
#	kg	mm				kN	
1	1,91	540	115	LINEAL	3/8"	12,25	GUADUA
2	3,27	489	129	CRUZ	3/8"	30,00	GUADUA
3	2,74	590	129	LINEAL	1/2"	16,19	GUADUA
4	3,68	418	130	CRUZ	1/2"	31,86	GUADUA

**Nota 1:** Los ensayos se realizan en una prensa PINZUAR de 1000 kN de capacidad.

**Nota 2:** Los resultados corresponden solo a las muestras enviadas al laboratorio.

**ORLANDO GIRALDO BOLIVAR I.C.**  
**COORDINADOR**

Laboratorio de Estructuras, Calle 65 No 78 – 28, Bloque M1 Oficina 101, Tel-Fax: 4255233  
 E-mail: labes\_med@unal.edu.co